

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



Trabajo de diploma para Optar por el Título de Ingeniero Geólogo

Ideas conceptuales sobre la utilización de las arcillas del depósito Farallones como materia prima para la fabricación de materiales cementicios suplementarios.

Autor: Carlos Alberto Matos Pérez

Tutor: Ing. Luis Alberto Pérez García

Co tutor:

Dr.C. Roger Samuel Almenares Reyes

Dr.C. Adrian Alujas

Moa, 2019

PENSAMIENTO

*...con el tiempo se sabrá que no es cuestión de títulos,
sino de la utilidad de los saberes...*

Israel Rojas

DEDICATORIA

A mi abuelo Chicho por haberme heredado parte de su carácter, y por ser fuente de motivación y sacrificio familiar.

A mi familia por ser la guía de mis pasos y el motor impulsor de todo lo bello que ocurre en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres María Cristina y Alberto por haberme dado la vida y enseñarme a transitar por este camino escabroso que algunos llaman vida.

A mis padrastros María Elvira y Ángel Ramos por haberme acogido como otro de sus hijos.

A mis hermanos Niurbis y Ale por ser parte de mi vida y por enseñarme a ser el grande y también el pequeño.

A mis abuelos Mauricio, Sofía, Mirta y Carlos por haber formado parte de esta experiencia y por permanecer a mi lado hasta este momento.

A mis primos Yordano y Ernesto por ser esos hermanos mayores que todo niño necesita para convertirse en hombre.

A mi tutor Luis por haberme involucrado en sus aventuras desde años tempranos de la carrera y por haberme permitido ser parte de esta maravillosa experiencia.

A mi Puchita por ser parte de mi vida y fuente de soporte en los días difíciles; sin ti no hubiese sido lo mismo.

A mis compañeros de cuarto y en especial a Luisi, Carlitos, Luis Daniel, Pedro y Yulian por haberme soportado estos cinco años y por convertirse en parte fundamental de mi experiencia universitaria.

A mi grupo de investigación Geotecnología de los Materiales, en especial a Ángel Eduardo y Yosvany por haberme ayudado a recorrer este arduo camino que es la preparación de una tesis.

Al claustro de profesores de la carrera por haberme enseñado el valor de la disciplina y los conocimientos necesarios para convertirme hoy en un buen ingeniero.

A mi cuñado, mis tíos y demás familiares.

A todo aquel que alguna forma u otra ayudó a este estudiante a convertirse en ingeniero.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización de las manifestaciones de arcillas de Farallones de Moa para su evaluación como materia prima para fabricación de material cementicio suplementario. Las muestras de las manifestaciones fueron caracterizadas química y mineralógicamente mediante técnicas de Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y Fluorescencia de Rayos X. Se calcularon los contenidos de caolín equivalente y se determinaron las pérdidas por ignición. Se realizaron análisis de actividad puzolánica mediante calorimetría isotérmica y la correlación de caolín equivalente y la resistencia a la compresión. Los resultados de análisis químico mostraron bajos valores de sodio, magnesio, calcio, manganeso, y fósforo, y la alta concentración de sílice y alúmina en el yacimiento. Además, se determinaron valores elevados de hierro y carbono. Se definió como paragénesis general la compuesta por cuarzo, moscovita, vermiculita, clorita, nacrita, albita, illita, caolinita y montmorillonita. Se obtuvo un 61,71% de caolín equivalente y un 8,61 % de pérdidas por ignición en el intervalo de 350°C a 850°C. El análisis de reactividad puzolánica reveló que la temperatura óptima para la activación térmica de las arcillas estudiadas es de 750°C. Según el método de François Avet los valores de resistencia a la compresión pronosticados superan con amplio margen los valores establecidos por la NC 2013. Se evaluaron las arcillas según la metodología de Almenares Reyes del 2017 como arcillas de tipo IV, que pueden presentar contenidos variables de caolín equivalente y contenidos apreciables de minerales no arcillosos tales como sulfatos y sulfuros.

ABSTRACT

The objective of this work is to characterize the clay manifestations of Farallones de Moa for evaluation as a raw material for the manufacture of supplementary cement material. The samples of the manifestations were characterized chemically and mineralogically by techniques of X-ray diffraction, differential thermal analysis and X-ray fluorescence. The contents of kaolin equivalent were calculated and the losses by ignition were determined. Pozzolanic activity analysis was performed by isothermal calorimetry and the equivalent kaolin correlation and compressive strength. The results of chemical analysis showed low values of sodium, magnesium, calcium, manganese, and phosphorus, and the high concentration of silica and alumina in the deposit. In addition, high iron and carbon values were determined. General paragenesis was defined as that composed of quartz, muscovite, vermiculite, chlorite, nacrite, albite, illite, kaolinite and montmorillonite. A 61.71% equivalent kaolin and an 8.61% loss by ignition were obtained in the range of 350°C to 850°C. The analysis of pozzolanic reactivity revealed that the optimum temperature for the thermal activation of the clays studied is 750°C. According to the method of François Avet, predicted compressive strength values exceed the values established by NC 2013 with a wide margin. Clays were evaluated according to the Almenares Reyes methodology of 2017 as type IV clays, which may have variable contents of kaolin equivalent and appreciable content of non-clay minerals such as sulfates and sulphides.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.....	4
Generalidades en la producción de Cemento Portland Ordinario	4
Producción de CPO en Cuba.....	5
Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).....	7
Empleo de MCS en Cuba	9
Arcillas: clasificación, características y origen	12
Las arcillas calcinadas como MCS.....	14
Activación térmica.....	15
Reacción puzolánica.....	17
Métodos para determinar de reactividad puzolánica.....	19
Perspectivas del empleo de las arcillas calcinadas como MCS en Cuba	21
CAPÍTULO 1- CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
1.1 Ubicación geográfica.....	23
1.2 Características socioeconómicas regionales y locales	23
1.3 Relieve	24
1.4 Clima.....	25
1.4.1 Precipitaciones.....	26
1.4.2 Humedad y evaporación	26
1.4.3 Vientos.....	26
1.4.4 Temperaturas y presiones atmosféricas	27
1.5 Vegetación regional	27
1.6 Hidrografía	27
1.7 Geología del área.....	28
1.8 Estratigrafía.....	30
CAPÍTULO II - MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	33
2.1 Introducción	33
2.2 Revisión bibliográfica (estado del arte)	33
2.3 Trabajos de campo y Muestreo.....	40
2.4 Trabajo de laboratorio	45
2.4.1 Preparación de las muestras	45
2.4.2 Cálculo de Pérdidas por Ignición.	47

2.4.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX) y análisis de Carbono-Azufre.....	47
2.4.4 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales	47
2.4.5 Análisis Térmico Diferencial (ATD)	50
2.4.6 Ensayo R3	50
2.4.7 Determinar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet	51
2.4.8 Metodología de Almenares Reyes	52
CAPÍTULO III - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	55
3.1 Introducción	55
3.2 Resultados del análisis químico	55
3.3 Resultados de la difracción de rayos X (DRX y DRXD)	56
3.4 Resultados del análisis térmico diferencial (ATD)	58
3.5 Resultados del cálculo de caolín.....	58
3.6 Resultados de la reactividad puzolánica según el método R ³	59
3.7 Resultados de la estimación de la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30.....	60
3.8 Aplicación del procedimiento de Almenares Reyes 2016 en la evaluación de las manifestaciones arcillosas como fuente de MCS	61
CONCLUSIONES.....	63
RECOMEDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65

Índice de figuras

Figura 1 - Producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI, 2012) ...	6
Figura 2 - Distribución de las fábricas de cemento en Cuba (Siverio Fernández, 2016)	7
Figura 3 –Empleo de materiales puzolánicos en la sustitución parcial del CPO (Scrivener, 2007).....	9
Figura 4 - Ubicación de los yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales en Cuba (Juventud Rebelde, 2007).....	10
Figura 5 - Comportamiento térmico de los minerales arcillosos (Snellings, 2011)	17
Figura 6- Mapa de ubicación geográfica del consejo popular Farallones del municipio de Moa a escala 1:100 000, tomado de Hamilton Suárez, 2015.....	23

Figura 7- Modelo digital del terreno del municipio Moa	25
Figura 8- Registro de precipitaciones de Farallones 2014-2018.	26
Figura 9- Esquema de la red Fluvial en farallones a escala 1:100 000. Tomado de (Hamilton Suárez, 2015).....	28
Figura 10 - Mapa Geológico esquemático de Farallones según Sánchez (2005). Escala 1:250 000. Modificado por el autor.	29
Figura 11- Arcillas verdes de alta plasticidad	42
Figura 12 - Arcillas rojas del punto número 2.....	43
Figura 13 - Arcillas del punto 3, con alta plasticidad y solubilidad en agua.....	44
Figura 14 - a) cuarteo en bandejas, b) accesorios del molino de anillos, c) molino de anillos.....	45
Figura 15 - a) Mufla con ventilación interna, b) mortero de ágata, c) pasta resultante luego de la molienda en húmedo.....	46
Figura 16 - a) Máquina de ultrasonido, b) diferentes series texturales.....	46
Figura 17 - a) Bruker, b) bandeja con las muestras, c) muestra.....	48
Figura 18 - Formulas del método para determinar la resistencia a la compresión a partir de (Avet, François et al., 2016)	51
Figura 19 - Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos.....	53
Figura 20 - Gráfica de DRX.....	57
Figura 21 - Distribución porcentual de las fases arcillosas.....	57
Figura 22 – Curvas de DRXD.....	58
Figura 23 - Curva de Análisis Térmico Diferencial	58
Figura 24 - Curva de calorimetría isotérmica.....	59
Figura 25 – Determinación de la resistencia a la compresión por el método de (Avet et al., 2016)	60
Figura 26 - Ubicación en el gráfico PPI (350-850 °C) vs. Al ₂ O ₃ del compuesto FR.	62

Índice de tablas

Tabla 1: Procesos tecnológicos de producción y producción de cemento de cada una de las fábricas en Cuba (GECEM, 2012).....	7
Tabla 2 - Minerales arcillosos más comunes (Siverio Fernández, 2016)	13
Tabla 3 - Criterios establecidos para la selección preliminar basado en la composición química.....	52
Tabla 4 - Composición Química de elementos mayoritarios expresado en volumen total de óxidos.....	55
Tabla 5 - Fases minerales identificadas	57
<i>Tabla 6- Resultados de la calcinación</i>	59
Tabla 7 - Tabla comparativa para criterio de clasificación.....	61

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 CO₂ es incrementar los niveles de sustitución parcial de clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS), dado que aproximadamente el 60 % de las emisiones de CO₂ en el proceso de producción del cemento Portland ordinario, están asociadas a la descomposición de la caliza durante la obtención del clínquer.

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, Martirena Hernandez y 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 et al., 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 Días, Alujas y Alujas Días, 2010). 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 y 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 Weerdt, aprovechando la reacción sinérgica entre la alúmina presente en el metacaolín y el carbonato de calcio contenido en la caliza (Estopiñales, 2016).

Existen en Cuba experiencias anteriores referentes a la investigación y uso de arcillas calcinadas para la obtención de materiales cementicios suplementarios, obteniéndose los mejores resultados en yacimientos de origen sedimentario como el antiguo yacimiento el Yigre, hoy yacimiento Yaguajay y el yacimiento Remedios. También han sido estudiadas otras manifestaciones de arcillas como la de Cayo Guam en Moa que presentan un origen residual desarrollado sobre gabros bandeados y otras de origen hidrotermal como el yacimiento Gaspar, Loma sur y Loma Norte.

Sin embargo, existen un grupo de arcillas con diferentes grupos genéticos que no han sido estudiadas aún en su totalidad, dentro de este grupo encontramos las manifestaciones arcillosas de Farallones de Moa, las cuales presentan un origen residual y se han desarrollado sobre rocas vulcanógeno-sedimentarias (tobas). No existen experiencias anteriores sobre el uso de este tipo de material arcilloso como material cementicio suplementario ni en Cuba ni el mundo, esta situación obliga a que se formule el siguiente **problema científico** de la investigación: ¿Cómo se relacionan las características geológicas, geoquímicas y mineralógicas de las manifestaciones de arcillas de Farallones y su utilización potencial como fuente de puzolanas?

Objetivo general: Evaluación de las características geológicas, químicas y mineralógicas de las manifestaciones de arcillas en Farallones para la producción de materiales cementicios suplementarios.

Objeto: Manifestaciones de arcillas en Farallones de Moa.

Campo de Acción: Mineralogía y geoquímica de las manifestaciones de arcillas en Farallones de Moa.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar química y mineralógicamente las manifestaciones de arcillas en Farallones de Moa.
- 2- Evaluación de las pérdidas por ignición, y caolín equivalente.
- 3- Evaluar la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica de los productos de calcinación.
- 4- Estimar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet.
- 5- Evaluar las potencialidades de las manifestaciones arcillosas de Farallones de Moa para la producción de materiales cementicios suplementarios.

Hipótesis: Si se evalúa la influencia de las características geológicas, mineralógicas y químicas de las manifestaciones de arcillas en Farallones, se podrá determinar su posible utilización como materia prima para la fabricación de materiales cementicios suplementarios.

MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL

Generalidades en la producción de Cemento Portland Ordinario

El Cemento Portland Ordinario (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 (Hendriks et al., 1998; Aitcin, 2000; 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 (Aitcin, 2000; Hendriks, Worrell y Jager, 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, 2010).

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, Martirena Hernandez y 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 (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 ± 0.1 MJ por Kg. de cemento producido, 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 (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 et al., 2011).

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". 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, Martirena Hernandez y 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 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.

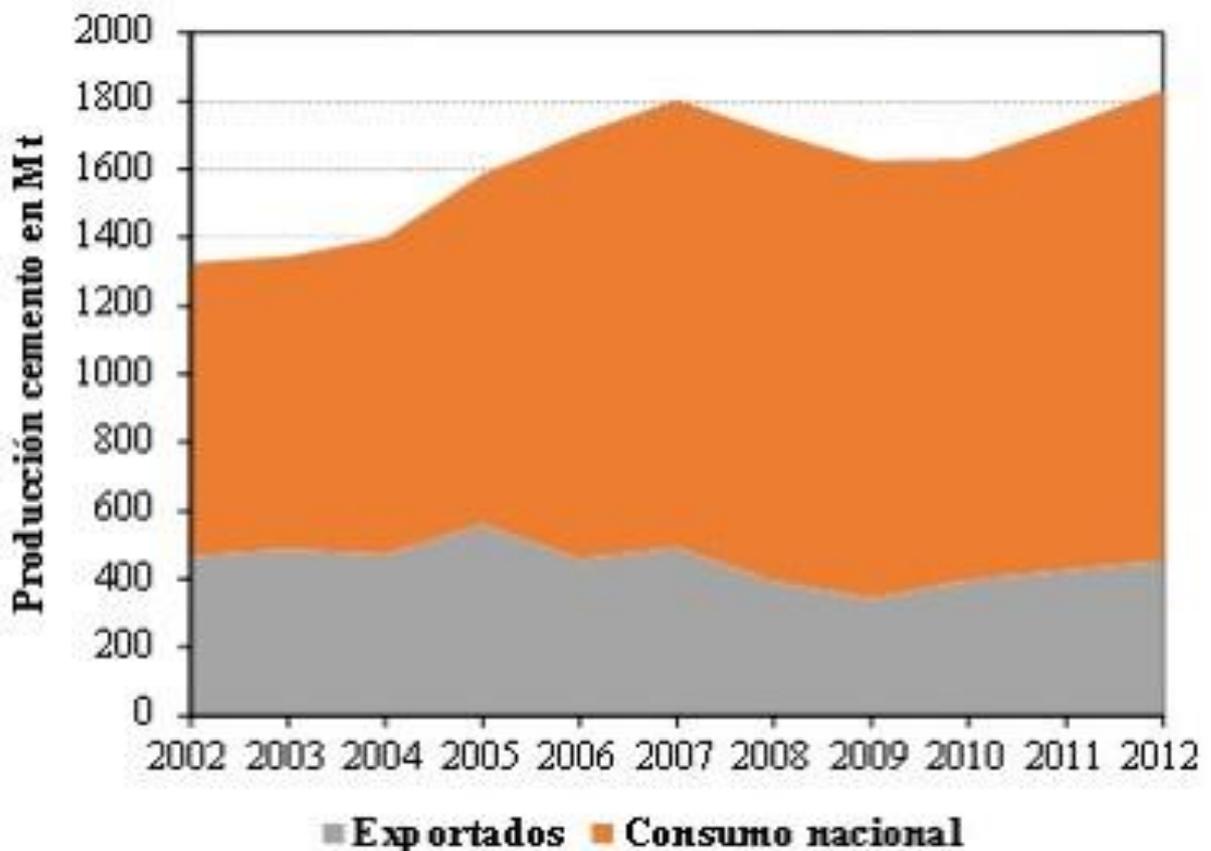


Figura 1 - Producción de cemento en Cuba entre 2002 y 2012 (ONEI, 2012)

Actualmente Cuba cuenta con 6 fábricas, con una capacidad disponible para producir *Cemento Gris* de 3,564 millones de toneladas anuales y *Cemento*

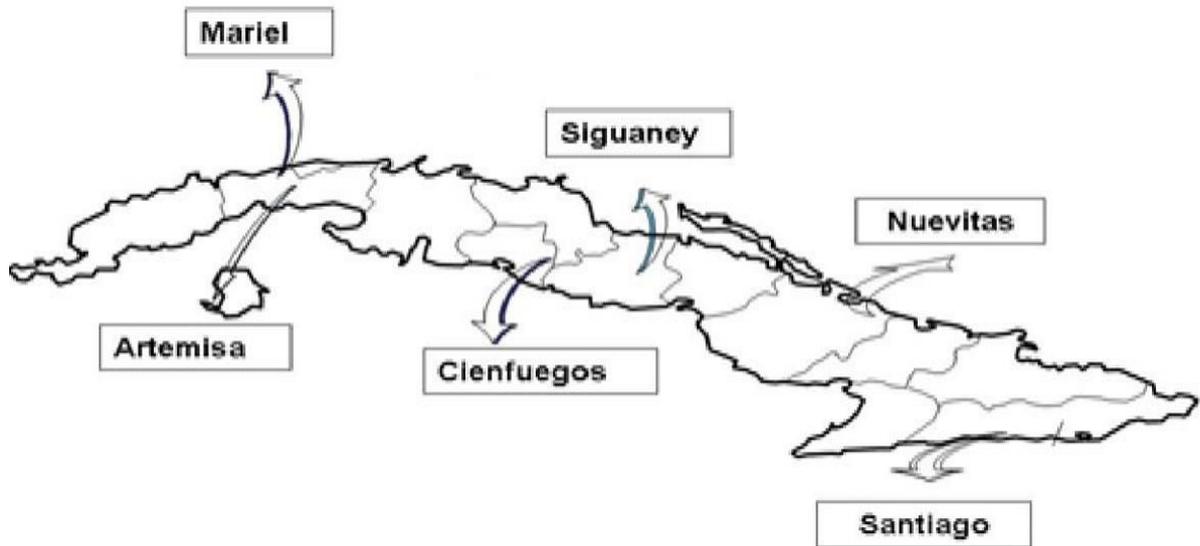


Figura 2 - Distribución de las fábricas de cemento en Cuba (Siverio Fernández, 2016)

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 2.

Tabla 1: Procesos tecnológicos de producción y producción de cemento de cada una de las fábricas en Cuba (GCEM, 2012)

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

La Tabla 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 (GCEM, 2012).

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 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 (Alujas, 2010; Martirena, 2004).

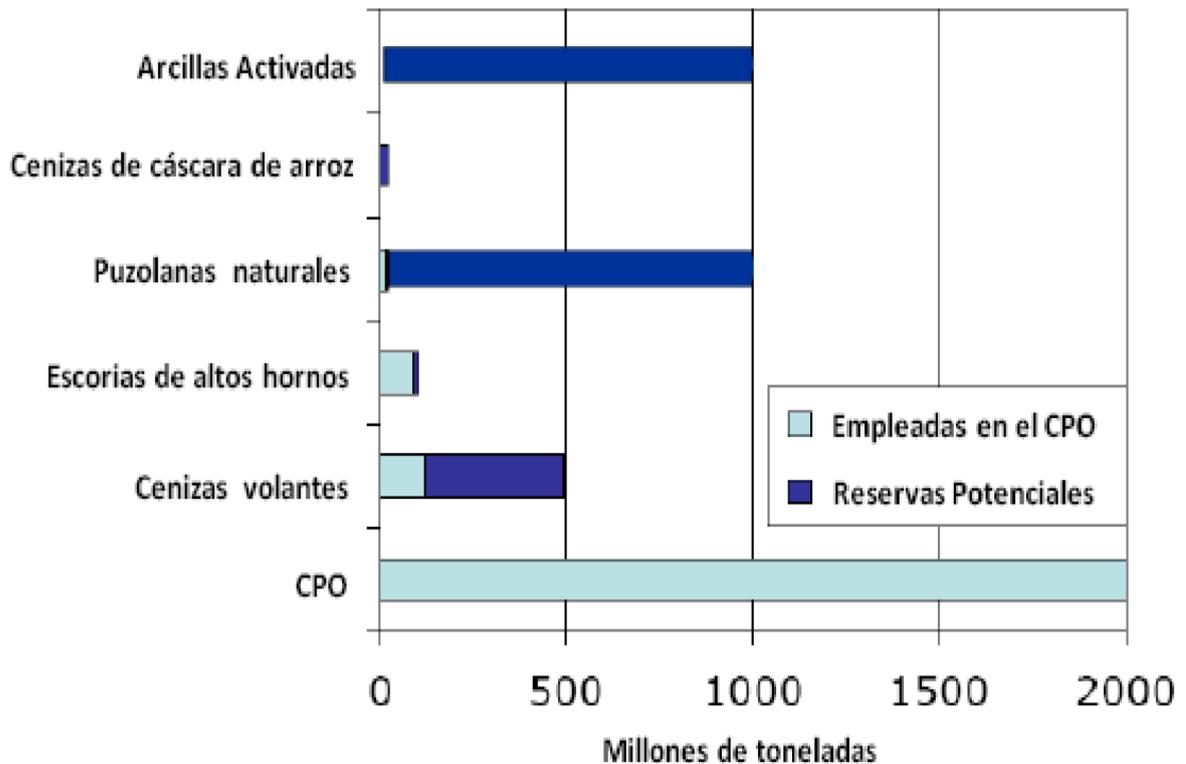


Figura 3 – Empleo de materiales puzolánicos en la sustitución parcial del CPO (Scrivener, 2007)

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 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 mordenita, 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 (Juventud Rebelde, 2007).

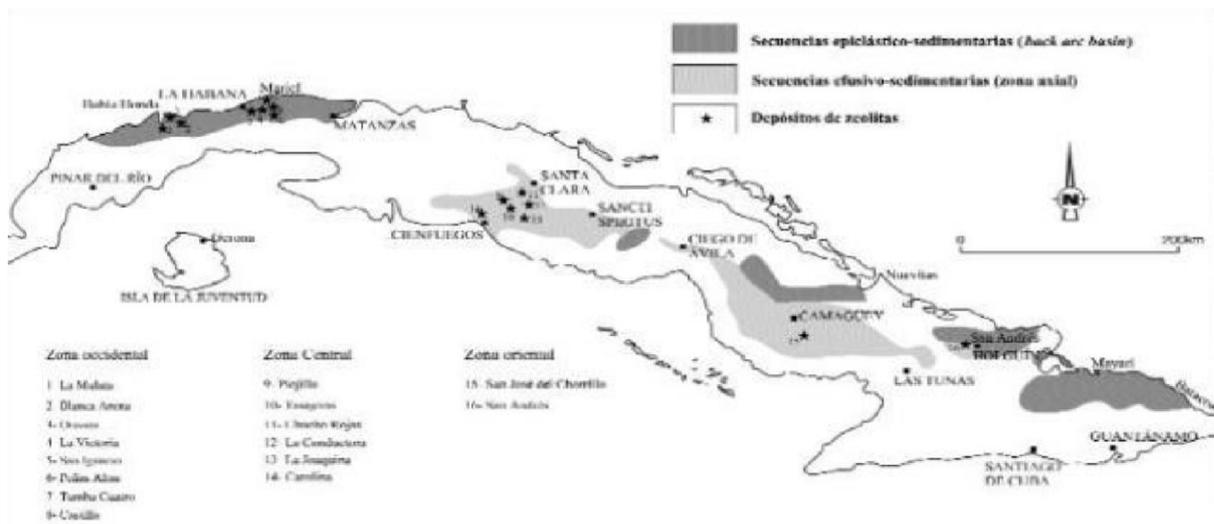


Figura 4 - Ubicación de los yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales en Cuba (Juventud Rebelde, 2007)

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.

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 Días, Alujas y Alujas Días, 2010; Martirena, Martirena Hernandez y Martirena, 2004). Las investigaciones llevadas a cabo por Alujas, Castillo y Fernández (Alujas Días, Alujas y Alujas Días, 2010; 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 al 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 de cemento, disminuir sus costos, mitigar las emisiones CO₂ 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 (Herrera del Sol, 2018).

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 μm . Pero al verlo desde un punto de vista mineralógico este criterio 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 palygorskita-sepiolita. Las illitas y las cloritas son formadas predominantes 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 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 Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} y 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 (Fernandez, 2008). 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.

Tabla 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

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 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 y 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 et al., 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 y 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 y Day, 2001). Para alcanzar el máximo potencial de las mismas se activan térmicamente, a partir de un intervalo de temperatura que depende del tipo de arcilla, grado de cristalinidad y distribución granulométrica (Todor, 1976).

Activación térmica

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 Días, Alujas y Alujas Días, 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 y 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 clinquerización (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, Wild y Bai, 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 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 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⁻ 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 y Makovicky, 1995; Samet, Mnif y 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, Osbaeck y Makovicky, 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.

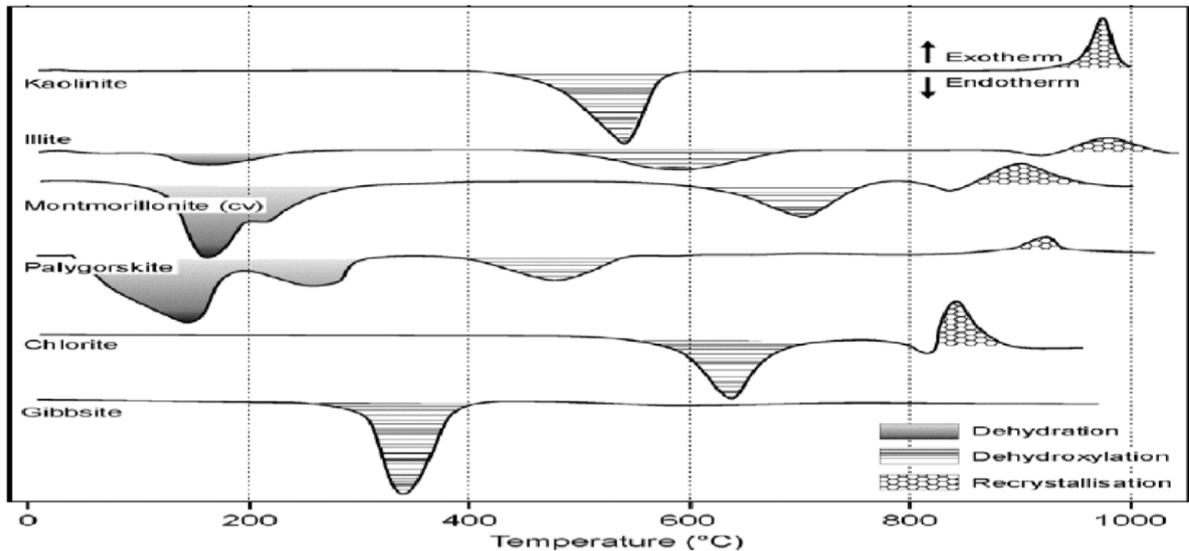


Figura 5 - Comportamiento térmico de los minerales arcillosos (Snellings, 2011)

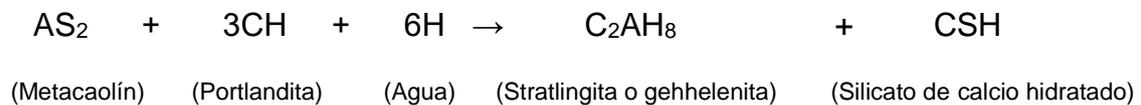
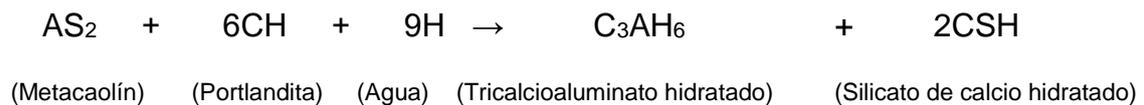
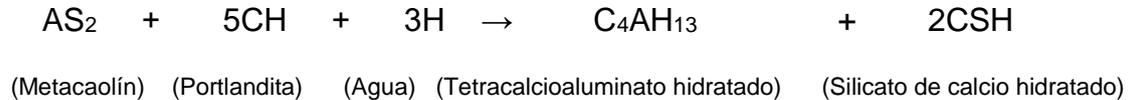
Reacción puzolánica

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 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 K^+ y el Na^+ son los cationes dominantes. Sin embargo, la abundante presencia de 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 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. 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 y 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 Ca (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 y 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 (C₂ASH₈) y los hidroaluminatos de calcio (C₃AH₆) (Fernández, 2009). 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).

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 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 et al., 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, 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. 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 y 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 y 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).



$$V_t = 2.318$$

$$V_t = 2.167$$

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 H.J. Jakobsen, and J. Skibsted, 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 R³ (*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)

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 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 Días, Alujas y Alujas Días, 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 Spiritus 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 CO₂).

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 Días, Alujas y Alujas Días, 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 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).

CAPÍTULO 1- CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra situada al sur-suroeste del municipio de Moa, perteneciendo al grupo Montañoso Cuchillas del Toa, limita al norte con el consejo popular Centeno-Cayo Chiquito, al sur con el municipio de Yateras, al este con los consejos populares Punta Gorda y La Melba y al oeste con el poblado de Cananova (Moa) y San Pedro (Sagua de Tánamo), (ver Figura 6).

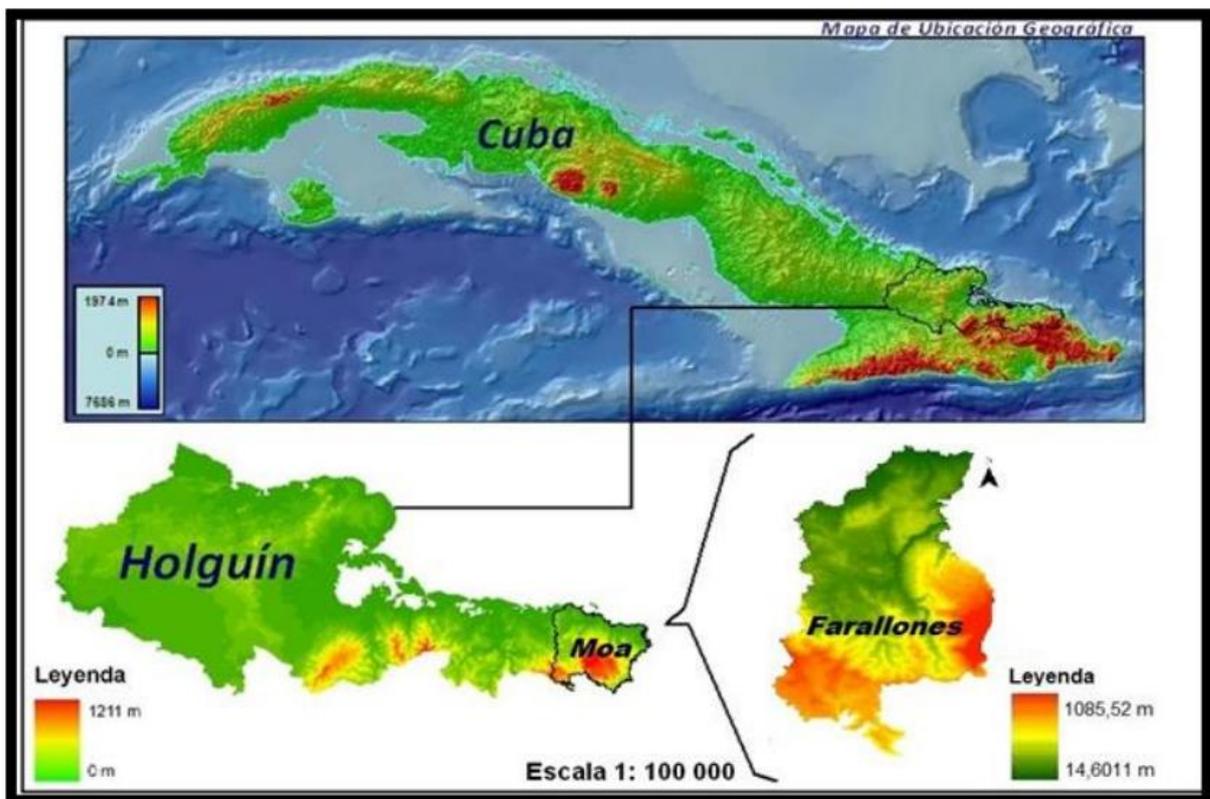


Figura 6- Mapa de ubicación geográfica del consejo popular Farallones del municipio de Moa a escala 1:100 000, tomado de Hamilton Suárez, 2015.

1.2 Características socioeconómicas regionales y locales

El municipio Moa se caracteriza por la complejidad de los procesos geológicos geomorfológicos que le dieron origen. En él existen extensas cortezas de meteorización, lo que ha permitido el desarrollo de la minería y metalurgia en la región y por ende su desarrollo económico, social y cultural. En 1963 se crea el municipio de Moa perteneciente a la región minera de la provincia de Oriente y

en 1976 por división política administrativa, pasa a la provincia de Holguín. Hoy, Moa cuenta con varios centros de enseñanza, hospitales, hoteles, un aeropuerto y otras instalaciones que favorecen el desarrollo económico, social y cultural en el municipio. Cuenta además con las plantas procesadoras de níquel Comandante Pedro Sotto Alba y Comandante Ernesto Che Guevara. La ciudad y las instalaciones mineras son visitadas por interés económicos, solo algunos espacios son utilizados para fines turísticos y ecológicos.

La comunidad de Farallones es un exponente fuerte para el turismo de naturaleza, debido a la belleza de sus paisajes, a la presencia del Parque Alejandro de Humboldt, a la diversidad de flora y fauna, además de presentar un alto grado de endemismo. Estas bellezas son atractivos inigualables, pero serían aún mayores si se llevaran a la par de ofertas teniendo en cuenta el patrimonio cultural de su comunidad. Esta localidad posee grandes atractivos naturales y culturales que hasta el momento no han sido explotados por las instituciones, ni por las instalaciones turísticas, imposibilitando un intercambio cultural entre el turista y sus pobladores. Existen antecedentes de proyectos relacionados con la explotación de esta zona con fines turísticos, aprovechando su riqueza y belleza natural, pero en ningún momento involucrando a la comunidad como un componente protagónico en los mismos. Del mismo modo, se han realizado investigaciones tanto nacionales como internacionales que demuestran las verdaderas potencialidades naturales y culturales de la zona, pero partiendo en cada término de lograr la consecución de un proyecto netamente turístico, dejando a un lado el elemento fundamental que sostiene los proyectos sociales; la comunidad. Se resaltan como aspectos claves el sector agrícola y el minero-industrial (Hamilton Suárez, 2015).

1.3 Relieve

El relieve del territorio se caracteriza por una franja costera llana con alturas hasta de 200 metros, bastante estrecha y las altas montañas del sistema Sagua – Baracoa, que se extienden hacia el sur con alturas superiores a los mil metros, la mayor de las cuales es el Pico Toldo en las Cuchillas de Moa, con mil ciento setenta metros sobre el nivel del mar, ricas en recursos forestales y variados helechos.

La franja costera tiene una extensión de unos mil metros, llana y en ocasiones con ligeras alturas. Esa zona es seguida por un sistema premontañoso que se prolonga hasta unos seis a diez kilómetros al sur de la costa con alturas medias entre 200 y 500 metros. Sus principales elevaciones son el Cerro de Miraflores al oeste, las minas de la Pedro Soto Alba y las alturas de Cayo Guam.

La otra característica del territorio es la parte montañosa, con alturas entre 500 y más de 1000 metros, que incluyen las Cuchillas de Moa, Calentura, Farallones y las de Gran Tierra.

La zona montañosa del territorio alcanza 363 km², el 50 por ciento del total, la que se encuentra dentro del Plan Turquino y una gran parte de ella se encuentra dentro del Parque Nacional Alejandro de Humboldt, Patrimonio de la Humanidad(Chacón Moreira, Chacón y Chacón Moreira, 2015)

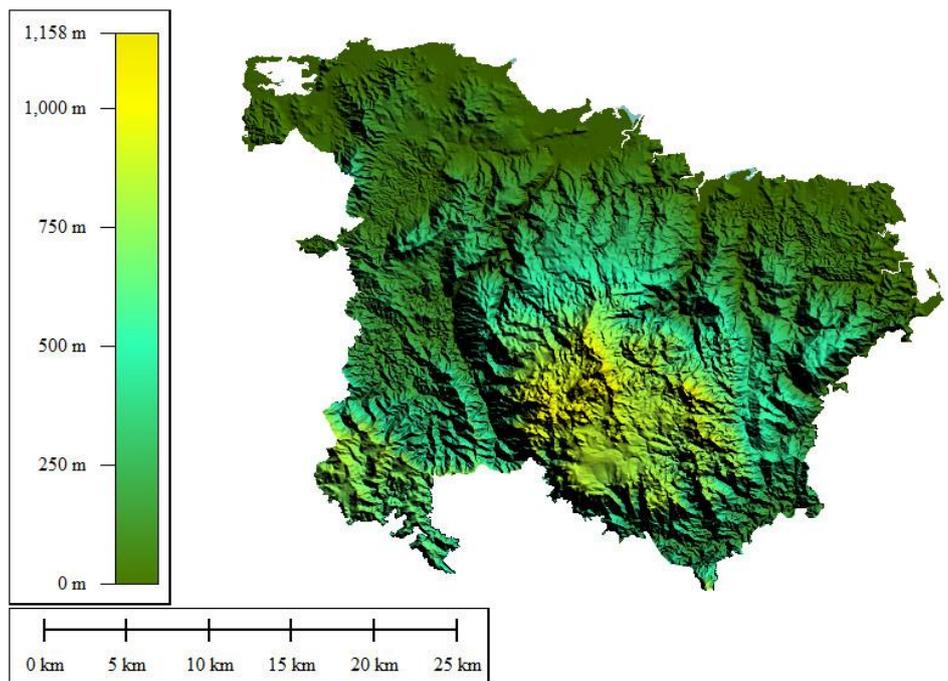


Figura 7- Modelo digital del terreno del municipio Moa

1.4 Clima

El clima es tropical húmedo con abundantes precipitaciones, estando estrechamente relacionadas con el relieve montañoso que se desarrolla en el área, dado que las montañas del grupo Sagua-Baracoa actúan como pantalla a

los vientos alisios y la dirección de los vientos alisios. La zona se reporta como una de las mayores precipitaciones del país.

1.4.1 Precipitaciones

Las precipitaciones poseen un promedio anual entre 700-1800 mm, siendo unas de las mayores pluviometrías del país, con una media histórica de 2500 mm/año. Se identifican dos períodos de lluvia abril-mayo y octubre-noviembre y dos de sequías enero-marzo y julio. En el verano las lluvias tienen carácter de aguaceros y en el invierno son menos intensas, pero más permanentes.

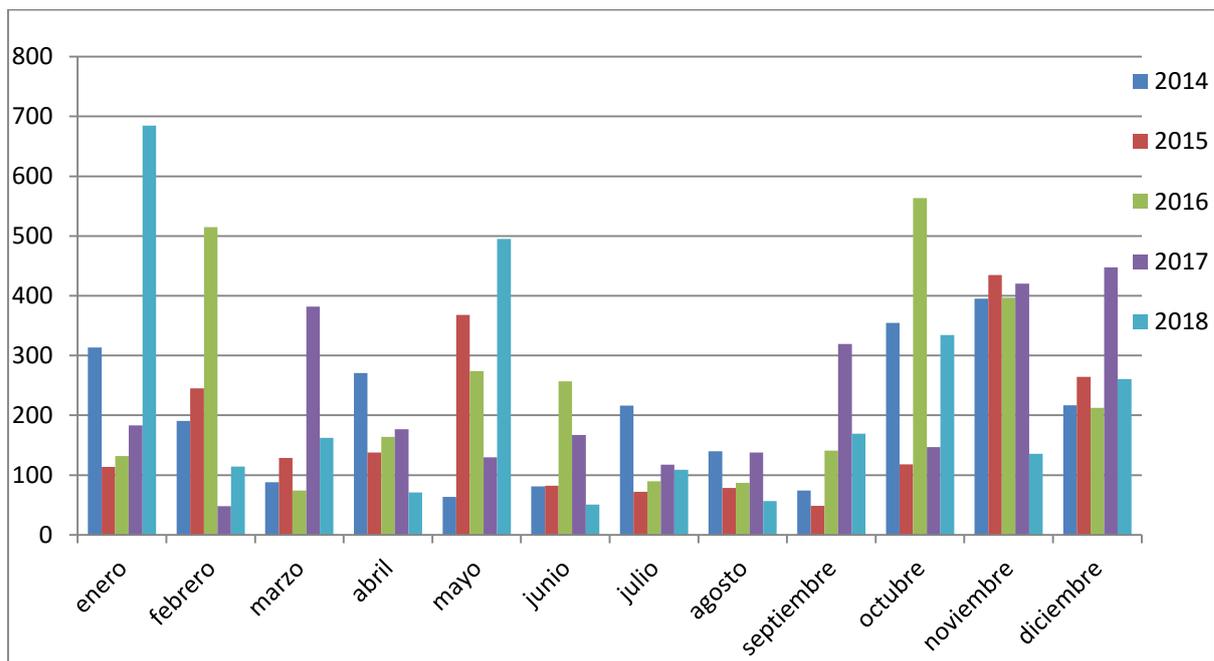


Figura 8- Registro de precipitaciones de Farallones 2014-2018.

1.4.2 Humedad y evaporación

La humedad relativa media anuales de 85%, los meses de mayor humedad son diciembre con un 94%, noviembre con un 86% y octubre con un 90%. Siendo estos tres meses el período de mayor humedad relativa del territorio. La evaporación anual presenta valores entre 2200 - 2400mm; los meses de julio y agosto son los más secos (Hamilton Suárez, 2015).

1.4.3 Vientos

Los vientos son de moderada intensidad, en superficie presentan dirección noreste este fundamentalmente. La distribución frecuencial anual de la dirección e intensidad del viento durante el año muestra que el sur es la más

notable, con un 37.41%, seguido de los vientos de sentido norte-este con 32.52%, mientras que el resto de las direcciones poseen una frecuencia inferior al 10%, siendo la dirección oeste la de menor ocurrencia, con un 0.41%. (Hamilton Suárez, 2015)

1.4.4 Temperaturas y presiones atmosféricas

La temperatura media anual oscila entre 22.6°C-30.5°C, en el verano se alcanzan valores de 30°C hasta 32°C y en el invierno de 22°C a 26°C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los fríos de enero a febrero. Las presiones atmosféricas presentan una media anual de 1017.3 hP, siendo la media máxima mensual de 1022.2 hP en el mes de septiembre (Hamilton Suárez, 2015).

1.5 Vegetación regional

La vegetación comprende el 33% del endemismo cubano. Se puede encontrar pinares, pluvisilvas, charrasco y bosques tropicales predominando el pinus cubensis y plantas latifodias, esta es la más importante y explotada económicamente, además de ser valiosa en la biodiversidad y la ecología por construir una flora generadora del suelo. También se pueden observar ejemplares del bosque de pluvisilvas, típico de selvas lluviosas; es una formación vegetal de constitución vigorosa que puede alcanzar hasta 40 m de altura, se implanta sobre cortezas lateríticas. También se desarrolla en laderas de arroyos y cañadas, una especie de camodaría latifolia, abundan los helechos en todas sus variantes, así como epifitas de orquídeas y bromeliáceas. Estos bosques retienen la erosión y favorecen la conservación de las fuentes de agua (Oliva, 1899).

1.6 Hidrografía

La red fluvial es bastante amplia y la misma tiene forma detrítica. Existen en la zona varios arroyos y cañadas destacándose el río Moa, el cual atraviesa los farallones dando lugar a una nueva cueva (ver Figura 9). En la periferia de la región encontramos la presa Nuevo Mundo, con grandes reservas de agua en la cual desemboca el importante río Calentura. El río Calentura corre en dirección SW-N, mientras que el río Moa en su nacimiento corre dirección S-N,

luego en dirección W-E para posteriormente en su confluencia con el río calentura(Hamilton Suárez, 2015).

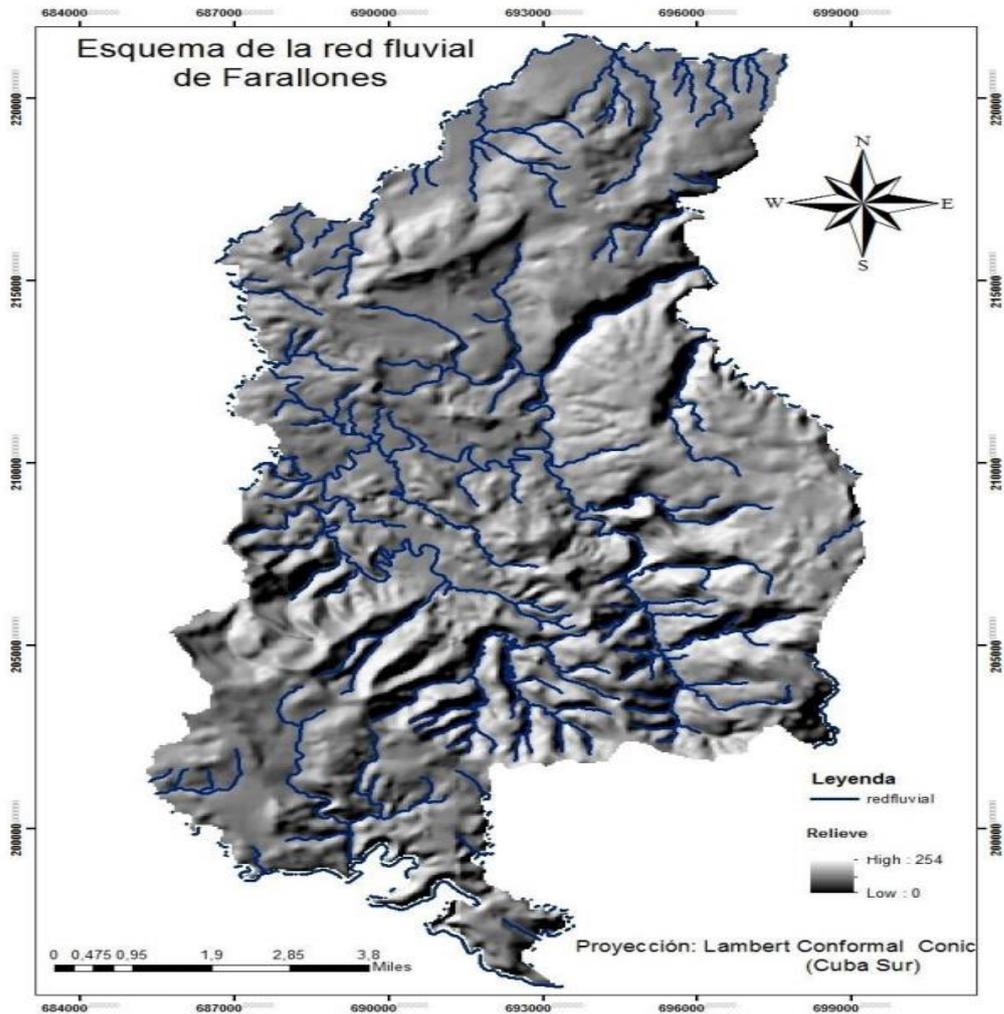


Figura 9- Esquema de la red Fluvial en farallones a escala 1:100 000. Tomado de (Hamilton Suárez, 2015)

1.7 Geología del área

Según la caracterización publicada en el libro “Contribución a la geología de Cuba Oriental”, se determinó cuáles son las formaciones geológicas que se asocian con el sector de Farallones.

Se consideró que según las características que presentan las rocas asociadas al basamento, se corresponden con el denominado Complejo Cerrajón y con las ofiolitas septentrionales en forma de escamas tectónicas, constituyendo una vinculación con el arco del Cretácico y unidades de naturaleza oceánica respectivamente (Sánchez, 2005).

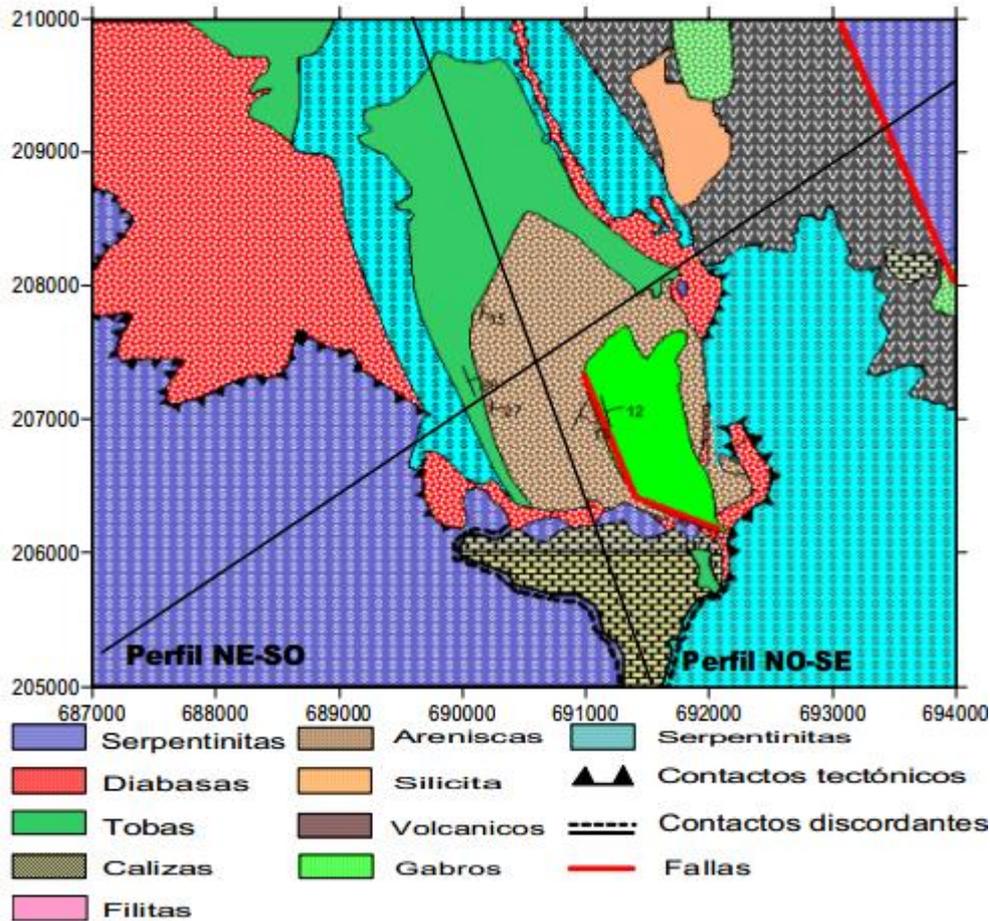


Figura 10 - Mapa Geológico esquemático de Farallones según Sánchez (2005). Escala 1:250 000.

Caracterizando más tarde el piso estructural superior se forman una serie de cuencas superpuestas al substrato plegado. Estas cuencas son caracterizadas como cuencas sedimentarias postvolcánicas y transportadas (piggy back) que reinician el nivel estructural en Cuba del Neoautóctono (Iturralde-Vinent; 1998). En ese tiempo se empezó a formar la cuenca de Farallones, en el Paleógeno, perteneciente a la época del Paleoceno Inferior (Daniense-66,4 m.a.). En ese momento comenzaron a precipitar los carbonatos, probablemente de un gran banco coralino, como para formar ese gran islote. Estas constituyeron las rocas más antiguas del segundo piso estructural, es decir, de la cobertura, formando parte de la conocida Fm. Gran Tierra. Después se sedimentan areniscas asociadas con un Miembro de la Fm. Gran Tierra. Entre el Paleoceno y el Eoceno (63.6-43.6 m.a.) comienza a formarse la Fm. Sabaneta, característica de las rocas vulcanógeno-sedimentarias; las cuales probablemente se

formaron gracias a una fuente de suministro que se encontraba muy alejada de la cuenca. Por último, la Fm. Sagua de Tánamo en el Eoceno Superior caracterizó a las areniscas de edad más joven en dicha cuenca (Sánchez, 2005).

1.8 Estratigrafía

La estratigrafía de la región va estar representada por la presencia del Complejo Cerrajón, las Ofiolitas Septentrionales y las formaciones. Gran Tierra, Sabaneta y Sagua de Tánamo.

Complejo Cerrajón

Está compuesto por diques subparalelos de diabasas y gabrodiabasas. La actividad volcánica se extendió desde el Aptiense al Campaniense Medio y fue el resultado de una subducción intraoceánica. Restos de este basamento ofiolítico del arco afloran actualmente y están representados por las anfibolitas de la Formación Güira de Jauco, al sur de la región de estudio. En la zona de contacto de estas rocas cretácicas con las ofiolitas, las mismas se encuentran deformadas, generalmente trituradas hasta brechas. En ocasiones los contactos coinciden con zonas muy fisuradas y foliadas, o con masas caóticas que contienen mezcla de bloques de ofiolitas y vulcanitas cretácicas (Gyarmati y Leyé O´Conor, 1990).

Fm. Gran Tierra

Descrita por M. Iturralde-Vinent en 1976, se trata de una formación que se desarrolla en forma de pequeñas franjas en las provincias de Holguín, Guantánamo y Santiago de Cuba. Se compone principalmente de conglomerados monomícticos con cemento calcáreo, que transicionan hasta calizas fragmentarias producto de la disminución del volumen del material cárstico: se intercalan areniscas calcáreas vulcanomícticas y tobáceas, limonítas, tufitas margas y tóbas. Esta unidad se depositó en un ambiente marino de profundidades medias, con una fuerte inestabilidad tectónica, lo que imprime a estos sedimentos un carácter turbidítico. Su formación se sitúa durante el Paleoceno Inferior (Daniano)(Léxico estratigráfico de Cuba, 2013).

Fm. Sabaneta

Descrita por M. Iturralde en 1976, se desarrolla en forma de faja alargadas en las provincias de Guantánamo y Holguín. Litológicamente está compuesta por tobas de ácidas a medias, de colores claros, vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, limolitas, margas, gravelitas, conglomerados vulcanomícticos y ocasionalmente pequeños cuerpos de basaltos, andesitas, andesito- basaltos y andesito-dacitas. Es muy característica, debido a la alteración de las tobas, la presencia de minerales del grupo de la montmorillonita (bentonita) y de las zeolitas (zeolitas). En las tobas, el promedio de vidrio volcánico es superior al 60%.

Yace concordantemente sobre la Fm. Gran Tierra y discordantemente sobre las formaciones La Picota, Mícara y Sierra del Purial. Está cubierta concordantemente por las formaciones Charco Redondo y Puerto Boniato y discordantemente por las formaciones Baracoa, Cabacú, Mucaral, Río Maya, San Ignacio, Sierra de Capiro, San Luis y la Fm. Yateras y los miembros Cilindro y Vega Grande de la Fm. Maquey (Gr. Guantánamo) y la Fm. Júcaro (Gr. Nipe).

La edad determinada es del Paleoceno Inferior (Daniano, parte alta) - Eoceno Medio y se formó en un ambiente marino con un régimen dinámico de las aguas muy inestable y un aporte piroclástico considerable producto de la cercanía a centros magmáticos explosivos (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013).

Fm. Mucaral (Sagua de Tánamo)

Descrita por J. L. Cobiella, 1983; se desarrolla en las regiones de Sagua de Tánamo, Mayarí, Sierra de Nipe y Baracoa, en las provincias de Guantánamo y Holguín. En ella se aprecia una secuencia terrígena compuesta principalmente por margas, margas arcillosas y margas calcáreas bien estratificadas, con intercalaciones frecuentes de calizas margosas, arcillosas y biodetríticas, más raramente de areniscas calcáreas. La secuencia, en su parte inferior, presenta intercalaciones frecuentes de margas y calizas tobáceas, de tobas y tufitas redepositadas que en varios lugares es subyacente. Está cubierta discordantemente por la Fm. Yateras y el Mbro. Vega Grande de la Fm. Maquey (Gr. Guantánamo) y las formaciones Bitirí y Camazán (Gr. Nipe).

Tesis en opción al Título de Ingeniero Geólogo

Su edad ha sido establecida en el Eoceno Medio parte alta - Eoceno Superior y su formación se produjo en un ambiente sedimentario de aguas marinas profundas (Léxico estratigráfico de Cuba, 2013).

CAPÍTULO II - MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

2.1 Introducción

En el presente capítulo se abordan las diferentes etapas en que fue concebida la investigación centrándose en las diferentes técnicas analíticas utilizadas durante el desarrollo de la misma. El trabajo durante su desarrollo se dividió en tres etapas fundamentales, según el orden mostrado a continuación:

- Etapa 1: Recopilación y procesamiento de la información existente
- Etapa 2: Toma y preparación de las muestras
- Etapa 4: Trabajos de laboratorio
- Etapa 3: Interpretación de los resultados (Trabajo de gabinete)

2.2 Revisión bibliográfica (estado del arte)

No existen referencias bibliográficas en el país del uso de estas arcillas para la fabricación de MCS, ni de materiales de génesis similares a las arcillas de Farallones. Pero si existen experiencias sobre el uso de arcillas caoliníticas en otras regiones de territorio y del mundo.

- Alujas Días, 2010, fue el primero en proponer la activación térmica de arcillas caoliníticas cubanas en el depósito Carranchola-La Moza en el cual la presencia de caolinita es de 40%. Se obtuvo que la temperatura necesaria para lograr la mayor activación térmica del producto era 800°C, con lo cual se obtuvieron resultados de resistencia a la compresión fueron similares o superiores en los morteros durante todas las edades con una sustitución de 30% de CPO por la fracción arcillosa multicomponente activada térmicamente. Además, se redujeron los valores sorptividad y porosidad capilar a todas las edades.

- Cisnero Palacio, 2010 en su tesis de pregrado titulada: "Caracterización Geoquímica de las cortezas de Meteorización alíticas en Cuba Oriental: zonas de Moa-Sagua de Tánamo", presenta una caracterización geoquímica basada en los análisis químicos, recomendando un seguimiento de su estudio a gran escala, además de analizar sus posibles usos para el beneficio local y nacional.

Fueron tomadas 23 muestras en total y se analizaron por Fluorescencia de Rayos X y los resultados se procesaron con los programas *Grapher 4*, *Microsoft Excel* y *Surfer 8*. Como resultados de la investigación se establece que en las áreas de Baconal, El Culebro, Caimanes, Farallones y Cayo Guam las cortezas se desarrollaron a partir de rocas volcánicas y vulcanógeno-sedimentarias de los Arcos de Isla del Cretácico y Paleógeno de las Formaciones Téneme, Sabaneta y gabros de la asociación ofiolítica, respectivamente. Se concluyó que las cortezas de meteorización en Baconal, El Culebro, Caimanes, Farallones y Cayo Guam son principalmente ferrosialíticas y establece que las arcillas de Caimanes y Farallones son aptas para ladrillos y pueden ser utilizadas para piezas refractarias.

- Njila, Martínez, Fernández , & Melgar, 2010 este estudio presenta una evaluación mineralógica semicuantitativa de las cortezas de meteorización no niquelíferas en las áreas de Baconal, El Culebro, Caimanes y Farallones en la región nororiental de Cuba. Su objetivo principal fue determinar las principales fases minerales, su distribución, concentración y grado de transformación de los minerales en los perfiles de meteorización. Las muestras, 16 en total, se analizaron mediante Difracción de Rayos X; los resultados se procesaron con los programas ANALYZE y AUTOQUAN. El grado de transformación de los minerales en relación con la distribución, concentración de las fases y el avance de la meteorización se determinó por el Índice Mineralógico de Alteración. Las principales fases minerales presentes en Baconal y El Culebro son caolinita (50-75%), caolinita- montmorillonita (50-75%), cuarzo (25-50%), plagioclasas, principalmente albita (25-50%) y hematita (<10%). En Caimanes y Farallones las fases principales son caolinita hematita, cuarzo, feldespatos potásicos, principalmente ortoclasa, todos en más de un 50-75%. También están presentes la halloysita (<10%) y montmorillonita (<10%). Se evidencia una transformación mineral extrema en los horizontes intermedios y superiores en Baconal, El Culebro y Caimanes (Índice Mineralógico de Alteración con valores entre 29 y 98%). Esta transformación también se observa en el perfil completo de Farallones (98-99%). Se concluye que las cortezas de meteorización en Baconal, El Culebro, Caimanes y Farallones son

principalmente arcillas caoliníticas. Palabras clave Arcillas, índice mineralógico de alteración, mineralogía, Cuba nororiental, corteza de meteorización.

- Alvarez, 2013 en la investigación titulada Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento, se realizó un estudio de la influencia de la temperatura en la activación térmica de un material arcilloso proveniente de la región de Cayo Guam en el municipio de Moa, con el objetivo de evaluar la reactividad puzolánica de los productos de calcinación y de su potencial empleo como sustituto parcial del cemento Pórtland. La muestra de arcilla fue activada térmicamente a temperaturas de 600,750 y 900°C, durante un tiempo de 60 minutos. La actividad puzolánica de los productos de la calcinación fue evaluada a partir de los ensayos de resistencia mecánica en morteros con un 30 % de reemplazo de cemento Pórtland por arcilla calcinada. Los morteros con sustitución de arcilla calcinada a 600°C fueron los que mostraron mejor actividad puzolánica, tanto para 7 como para 28 días de curado, seguidos de los elaborados con arcilla calcinada a 750 y 900°C respectivamente.

- Tendai Njila (Njila, 2016) en su caracterización químico-mineralógica de cortezas de meteorización ferrosialíticas en el noreste de Cuba oriental refiere que las arcillas de Cayo Guam pueden ser empleadas para elementos refractarios y menciona la existencia de un material arcilloso de poca calidad en la comunidad de Farallones de Moa.

- Almenares Reyes et al., 2016, en el artículo: "Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC 3). Octubre-Diciembre", recoge un estudio hecho para analizar los materiales arcillosos procedentes de dos afloramientos de la región de Moa para determinar su potencialidad de uso como material cementante suplementario en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. Las arcillas se caracterizaron mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (ATG). Estos métodos revelaron en las arcillas alto contenido de aluminio, moderado contenido de caolinita, una estructura desordenada y presencia de

impurezas. La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC 3 es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural (afloramiento D1), aunque las arcillas de ambos afloramientos pueden constituir materiales cementicios suplementarios en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. El rango de activación térmica adecuado para ambas arcillas se ubica entre los 650°C y 850°C.

- Almenares Reyes, 2017 en su doctorado estableció a partir de la composición química y mineralógica, criterios de clasificación que permiten identificar las potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas como fuente de materia prima para la obtención de materiales cementantes suplementarios. En las arcillas caoliníticas cubanas (Cayo Guam, Loma Sur, La Loma y Yaguajay) provenientes de depósitos de diferente génesis geológica, que fueron caracterizadas mediante EAA, FRX, DRX y ATG, predominan minerales arcillosos del grupo de la caolinita, lo que los convierte en fuentes potenciales de MCS y a esto se le suma que presentan relativamente altos contenidos de hierro que limitan su explotación en aplicaciones de los caolines industriales. Los productos de calcinación de las arcillas estudiadas fueron caracterizados mediante FRX, DTP, BET, MEB-EDX. La evaluación de la reactividad puzolánica de estos productos fue monitoreada a través del protocolo R3, solubilidad alcalina, y resistencia a la compresión en morteros normalizados. El contenido de minerales arcillosos del grupo de la caolinita es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica. La temperatura de activación térmica y la presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también muestran influencia sobre la reactividad puzolánica. La reactividad puzolánica de las arcillas caoliníticas activadas térmicamente es directamente proporcional al contenido de Al soluble en medio alcalino. Los cementos de base clínquer-arcilla calcinada- caliza formulados fueron caracterizados en su estado anhidro mediante DTP y BET. Las pastas fueron caracterizadas mediante DRX, ATG y MIP. Los morteros normalizados de cementos LC3, presentaron, a los 7 y 28 días, valores de resistencia a la compresión similar o superior a los de un cemento P-35. Para estos cementos

la formación de productos de hidratación y el consumo de portlandita muestran una correlación directa con la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas. Se propone un procedimiento, basado en la composición química del material ($\% \text{Al}_2\text{O}_3 > 18,0$; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,3$; $\text{PPI} > 7,0$; $\% \text{CaO} < 3,0$; $\% \text{SO}_3 < 2,0$), y la representación gráfica en un diagrama que combina el $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ con las PPI en el intervalo de 350 a 850°C. El procedimiento permite la clasificación y evaluación cualitativa de arcillas caoliníticas como fuente de materia prima en la obtención de MCS. Las muestras con mejores potencialidades son aquellas que presentan relativamente altos contenidos de Al_2O_3 y de pérdida de masa en el intervalo de la deshidroxilación de los minerales arcillosos.

Matos Pérez & Dunan Ávila, 2017 en la investigación "Potencialidades de las Arcillas del municipio Guamá, Santiago de Cuba, para su utilización como Material Cementicio Suplementario" evaluaron las potencialidades de estas arcillas sobre la base de su composición química. En las arcillas caoliníticas cubanas (Pinar de las Canas, La Anita, Sobicú y Boca de Dos Ríos) provenientes de depósitos de diferente génesis geológica, predominan minerales arcillosos del grupo de la caolinita, lo que los convierte en fuentes potenciales de MCS. La metodología utiliza donde se expone un procedimiento, basado en la composición química del material ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 18,0\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,3\%$; $\text{PPI} > 7,0\%$; $\text{CaO} < 3,0\%$; $\text{SO}_3 < 2,0\%$). El procedimiento permite la clasificación y evaluación cualitativa de arcillas caoliníticas como fuente de materia prima en la obtención de Material Cementicio Suplementario. Las muestras con mejores potencialidades son aquellas que presentan relativamente altos contenidos de Al_2O_3 y de pérdida de masa en el intervalo de la deshidroxilación de los minerales arcillosos. Como resultados se obtienen que las Arcillas del yacimiento Sibacú presentan elevadas potencialidades para que sean utilizadas como Material Cementicio Suplementarios; mientras que las presentes en los otros yacimientos estudiados se encuentran por debajo de la norma.

Vera Lazcano, 2018, en su investigación titulada: "*Evaluación de la actividad puzolánica y comportamiento térmico de las arcillas del yacimiento Yaguajay como materia prima para la producción de cemento de bajo carbono.*" estableció la composición mineralógica de las arcillas caoliníticas procedentes

del yacimiento de Yaguajay. Para su uso como materias primas para la obtención de materiales cementicios suplementarios, capaces de ser empleados en la formulación de cementos con altos volúmenes de sustitución del clínker. Las materias primas fueron caracterizadas mediante ATG y DRX, en este último se demuestra que el cuarzo y la calcita acompañan a los minerales del grupo de la caolinita en la mezcla compósito. La calcinación de las arcillas se realizó a una temperatura de 800°C. La evaluación de la reactividad puzolánica fue monitoreada a través del protocolo R3 y resistencia a la compresión en morteros normalizados con un 30% de sustitución de CPO por arcillas calcinadas. El contenido de caolinita y calcita de la muestra ensayada es de 75% y 2% respectivamente. De acuerdo a los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a los 3; 7 y 28 días obtenidos, muestran que los productos calcinados cumplen con los requisitos establecidos para cementos Portland P-35, según la NC 95:2011 y exceden los valores de la serie de referencia.

Herrera del Sol, 2018 en su tesis: "Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3." aborda el estudio de los tipos tecnológicos que conforman las arcillas del yacimiento Yaguajay, para su explotación como material cementante 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 compósito 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 R3) y resistencia a la compresión mecánica a diferentes edades, revelando los 800° C como temperatura óptima de calcinación, siendo el compósito B el de mayor reactividad puzolánica debido a elevadas cuantías de calcita encontradas en el mismo y el compósito A calcinado a 800° C como el de mayor resistencia a compresión.

Basado en las experiencias descritas anteriormente se procede a elaborar ideas conceptuales para el uso de arcillas de tipo residual desarrolladas sobre rocas vulcanógeno-sedimentarias (tobas).

2.3 Trabajos de campo y Muestreo

La revisión bibliográfica previa permitió establecer la existencia en la zona de cortezas de meteorización caoliníticas sobre tobas. El levantamiento realizado en el área permitió identificar al menos tres subtipos diferentes de esas cortezas. El criterio usado para la elaboración de los compósitos fue las variaciones texturales macroscópicas de las arcillas. En el punto 1 afloran cortezas no mayores de 30 cm de arcillas muy plásticas, de coloración gris verdosa, localizadas sobre tobas muy meteorizadas. En el punto 2 afloran cortezas rojizas, poco plásticas descritas por Njila, 2016 como perfiles caoliníticos oxidados en su tesis de doctorado. En el punto 3 aparecen arcillas amarillo rojizas, de elevada plasticidad que se desarrollan sobre rocas tobáceas.

Luego de la realización de las pruebas de caolín y calcita equivalente el material de mejor perspectiva fue el de las arcillas verdes desarrolladas sobre tobas zeolitizadas del punto número 1. Se procedió entonces a la elaboración de un compósito principal denominado *FR* a partir de tres muestras puntuales (CP-FR-1, CP-FR-2 y CP-FR-3) tomadas en el punto número 1 para su análisis químico y mineralógico en los laboratorios del *Karlsruhe Institute of Technology* en Alemania.

Las arcillas del compósito FR, presenta una serie de problemas para su evaluación a escala industrial pues tiene una distribución geográfica limitada y potencia y aflorabilidad poco definida. Pero se considera que el compósito elaborado a partir de las tres muestras puntuales es representativo para este tipo tecnológico, debido al carácter netamente académico que tiene este trabajo. Además, a partir del conocimiento que existe de la geología del área y de la intensidad de los procesos exógenos que en ella se desarrollan, se puede establecer que en profundidad exista una distribución más elevada de este tipo de material.

Punto 1

Hora: 10:50 a.m.

Fecha: 01/12/18

Farallones

Coordenadas

Longitud: 20° 31' 44,6568''

Latitud: -75° 01' 30,42100''

Descripción:

En el punto 1 afloran arcillas de coloración verdosa gris, muy plásticas, de granulometría fina, probablemente deban su coloración a la presencia de glauconita. La corteza no sobrepasa los 30 cm de espesor y se encuentra relacionada con tobas alteradas las que se intercalan dentro de la capa de arcillas a manera de relictos del proceso de meteorización. Encima de la capa de arcilla se desarrolla suelo con abundante vegetación de gramíneas y helechos entre otros, la capa de suelo es pardo oscuro, negro en algunos sectores, con abundantes raíces y materia orgánica en general. Esta capa de suelo no sobrepasa los 15 cm. De 15 a 40 cm aparece la capa de arcillas mencionada anteriormente y a partir de los 45 cm aparece un material de color verde poco arcilloso a manera de un saprolita de la toba original. El basamento está compuesto por tobas criptocristalinas, de coloraciones verdes y grises, con estratificación visible, teniendo estos desde 1 mm hasta 7 cm de espesor. Llama la atención la gran plasticidad que tiene la capa de arcillas. La aflorabilidad está restringida a un sector no mayor de 100 metros cuadrados y los espesores son bastante pequeños como se ha indicado anteriormente. Se tomaron aquí dos compósitos y dos muestras básicas, una de ellas de la zona saprolítica de las tobas. Igualmente se muestrearon las rocas del basamento. Se tomaron en este punto muestras de la roca madre y se elaboraron tres compósitos denominados CP-FR-1, CP-FR-2 y CP-FR-3.



Figura 11- Arcillas verdes de alta plasticidad

Punto 2

Hora: 11:49 a.m.

Fecha: 01/12/18

Farallones

Coordenadas

Longitud: 20° 30´42,6574´´

Latitud: -75°0´27,48074´´

Descripción:

En el punto 2 afloran arcillas de color rojizo, que puede llegar a ser ocre oscuro. Aflora en un área bastante extensa quizás unos 2 o 3 km cuadrados, desapareciendo a veces bajo la tupida vegetación. En las zonas altas alrededor del pueblo de Farallones estas arcillas afloran de manera discreta y las potencias no sobrepasan los 3 metros. De manera general poseen poca plasticidad. En el punto 2 el corte tiene un metro aproximadamente, de los cuales los primeros 15 cm corresponden a una capa de suelo de color oscuro, casi negro, con abundantes gramíneas, con raíces que no sobrepasan los 10

cm. A partir de ahí aparece una arcilla de poca plasticidad, deleznable, que se disuelve en agua con facilidad. La coloración no varía sustancialmente y predomina el rojo oscuro. Estas arcillas están contaminadas con la capa de suelo que le supra yace y quizás este sea el motivo de la baja plasticidad. En este sitio se tomó un compósito y una muestra básica. En este punto se elaboró el compósito CP-FR-4.



Figura 12 - Arcillas rojas del punto número 2

Punto 3 **Hora: 9:21 a.m.** **Fecha: 02/12/18** **Farallones**

Coordenadas

Longitud: 20°30'42,6574''

Latitud: -75°0'27,48074''

Descripción:

El punto 3 se encuentra ubicado cerca del campamento del CITMA de Farallones. Son arcillas de color rojo amarillento de elevada plasticidad que pudimos localizar gracias a un bibijagüero pues está cubierta por una capa de hierbas y suelo a su aflorabilidad es prácticamente nula. En este caso

recurrimos al uso del tirabuzón para hacer dos perforaciones de las cuales se realizaron tres compósito y se tomaron las muestras básicas.

En el punto 3 la perforación arrojó los siguientes resultados, el suelo es arcilloso, de color negro, con abundantes raíces de plantas y materia vegetal en general. La potencia de la capa de suelo vario en las dos perforaciones desde 8 cm hasta los 15. Debajo de la capa de suelo inicial aparece una capa de material arcilloso muy plástica más clara, pero sin llegar a las tonalidades de amarillo que tienen las arcillas en profundidad. A partir de los 20 cm aparece una arcilla muy plástica de coloración roja amarillenta que torna más amarilla según se profundiza, que se disuelve en agua con facilidad. Dentro de la arcilla se observan pequeñas alteraciones oscuras (oxidación).



Figura 13 - Arcillas del punto 3, con alta plasticidad y solubilidad en agua

También se puede encontrar algunas raíces de plantas. Aquí la vegetación es muy tupida, aparece una extensa capa de gramíneas y de plantas frutales (coco, mango, cacao, naranja, mandarina y café). La perforación en el primer pozo llegó hasta los dos metros y en el segundo hasta los 2.90 metros. En ambos casos se llegó hasta la roca basamento consistente con la roca madre descrita para las arcillas del área. No obstante, se hace necesario prestar atención especial a estas arcillas por la cercanía que tienen a los mogotes

carbonatados de Farallones sospechando un posible aporte de carbonato de calcio proveniente de la meteorización de las calizas. En este punto se tomaron muestras para elaboración de dos compósitos denominados CP-FR-5 y CP-FR-6.

2.4 Trabajo de laboratorio

2.4.1 Preparación de las muestras

Las muestras fueron preparadas en laboratorio físico del Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Una vez desempacados fueron depositados en bandejas plásticas y secados a temperatura ambiente.

Las muestras para Difracción de Rayos X se dividieron en dos grupos, las primeras fueron secadas a 40°C durante doce horas, luego fueron molidas en un molino de anillos en húmedo, usando 15ml de isopropanol y la segunda serie fue tratada a 105°C, para lograr un mejor secado de las muestras sin llegar a comprometer la composición mineralógica.



Figura 14 - a) cuarteo en bandejas, b) accesorios del molino de anillos, c) molino de anillos

Las muestras tratadas a 105°C, fueron molidas a mano en un mortero de ágata durante 15 minutos aproximadamente. Se usaron 15 ml de isopropanol para la molienda en húmedo, agregando 5 ml cada 5 minutos. El resultado fue una pasta que luego se secó a 40°C por 12 horas.



Figura 15 - a) Mufla con ventilación interna, b) mortero de ágata, c) pasta resultante luego de la molienda en húmedo.

Al tratarse de muestras de arcillas, se decidió hacer preparaciones texturales especiales para análisis de la fracción arcillosa (DRXD). En este caso las muestras ya molidas y previamente secadas fueron colocadas en tubo de ensayo (4-5 g) donde se les agregó una mezcla de agua con amoníaco al 10%. Luego fueron introducidas en una máquina de ultrasonido por 15 minutos, (ver Figura 16). Pasado ese tiempo, se dejaron en reposo durante una hora para luego volver a ser sometidas a 15 minutos de ultrasonido. Luego de este procedimiento, la fracción limo arcillosa, permanece en suspensión y la fracción no arcillosa va al fondo.



Figura 16 - a) Máquina de ultrasonido, b) diferentes series texturales.

Se prepararon tres series para análisis textural, la primera se colocó en placas de vidrio y se le permitió reposar durante 12 horas sin tratamiento alguno. Se nombró a esta serie T. La segunda fue tratada a 60°C en atmósfera de glicol

por 24 horas y la tercera fue sometida a una temperatura de 550°C durante 24 horas.

El análisis de la combinación de estas tres series de tratamientos permite la identificación y cuantificación de los minerales arcillosos presentes en las diferentes muestras.

2.4.2 Cálculo de Pérdidas por Ignición.

El cálculo de pérdida por ignición se realizó en el laboratorio de química del MPA en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Para ello se tomaron 2 g de muestras previamente secadas a 40°C y 105°C y pulverizadas. Seguidamente en crisoles de porcelana rotulados y pesados se tomó la medida del peso del material seco. Se calcinaron a 950°C durante dos horas y luego se dejó enfriar en una desecadora. Finalmente se midieron los diferentes pesos y se calcularon las pérdidas, que también fueron utilizadas para la corrección de los datos obtenidos por FRX.

Para el cálculo de las pérdidas por ignición a 750°C, 800°C y 850°C se utilizaron los datos aportados por los análisis termo-gravimétricos TG.

2.4.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX) y análisis de Carbono-Azufre

Las muestras para FRX se secaron a 40°C, luego se pulverizaron en el molino de anillos. Se tomaron 2 g de muestra previamente homogenizada y cuarteada, y se calcinaron durante 2 horas a una temperatura de 950°C. La ceniza resultante, fue colocada para su enfriamiento en una desecadora de vidrio. El método usado fue el de la perla fundida.

Las muestras para Carbono-Azufre fueron secadas a 40°C y posteriormente molidas en el molino de anillos. Hay que destacar que en cada de una de las preparaciones, se garantizó el adecuado cuarteo y homogenización de las muestras para garantizar en el marco permitido la representatividad de los análisis.

2.4.4 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales

Las diferentes series para análisis de la fracción arcillosa, se realizaron en un equipo Bruker con las siguientes condiciones: radiación CuK α y una rejilla de

divergencia de $0,5^\circ$. Las muestras fueron analizadas entre los 0 y los 80° (2θ), a un paso angular de $0,008^\circ$ y un tiempo por paso de 30 segundos.

Se utilizó el software HighScore Plus, con base de datos de 2015 y PD2 complementaria, utilizando primero, subrutinas programas y luego información obtenida del Manual de Difracción de Rayos X del Servicio Geológico de los Estados Unidos, así como fichas disponibles en la base de datos www.mindat.org.

Para la correcta identificación de las fases arcillosas se utilizaron los siguientes criterios. Las cloritas tienen sus picos (001) en 14 a 14,4 angstroms, dependiendo de la especie individual. Las posiciones de los picos no se modifican por la saturación de iones, la solvatación con etilenglicol o el calentamiento. Sin embargo, los tratamientos térmicos por encima de 500°C alteran las intensidades máximas. Normalmente, el pico de clorita (001) puede aumentar dramáticamente y los picos de orden superior pueden debilitarse notablemente. En muestras poli minerales, las cloritas se pueden distinguir de la caolinita comparando los picos de 3.58 angstrom de caolinita y 3.54 de angstrom clorita, de las esmectitas por la expansión y contracción del pico de esmectita (001) después de la solvatación con etilenglicol y el calentamiento a 400°C , y de la vermiculita por el colapso progresivo del pico de vermiculita (001) a los 550°C .



Figura 17 - a) Bruker, b) bandeja con las muestras, c) muestra

Los miembros del grupo illita por su parte se caracterizan por un intenso pico a los 10 angstrom (001) y un pico de 3.3 angstrom (003), que permanecen

inalterados por la solvatación con etilenglicol o glicerol, saturación de potasio y calentamiento a 550°C.

Para el caso de las caolinitas, en muestras mono-minerales, los miembros dioctaédricos de este grupo se identifican fácilmente porque se vuelven amorfos a los rayos X después de calentar a 550 grados y sus patrones de difracción desaparecen. La caolinita, la dickita, la nacrita y la halloysita pueden diferenciarse de la clorita mediante comparaciones del pico de caolín de 3.58 angstrom, con el pico de clorita de 3.54 angstrom y de la clorita y los miembros trioctaédricos de este grupo, mediante intercalación con acetato de potasio. El calentamiento por sí solo no distinguirá los minerales del grupo de caolinita dioctaédrica, de la clorita porque los picos de clorita (002), (003) y 004 también se debilitan por este tratamiento térmico.

Por su parte las esmectitas producen patrones de difracción de rayos X caracterizados por reflexiones basales que varían con la humedad, la exposición a ciertas moléculas orgánicas, el tratamiento térmico y los cationes intercambiables. Cuando se satura con etilenglicol, el reflejo (001) de la mayoría de las esmectitas se hinchará hasta aproximadamente 17 angstroms (aproximadamente 17.8 angstroms con glicerol); cuando se calienta a 400 ° C, la reflexión (001) colapsará a aproximadamente 10 angstroms (la cantidad exacta de colapso a menudo se relaciona con los cationes de intercambio presentes y con la esmectita en sí). Las esmectitas individuales a veces se pueden diferenciar por sus picos de orden superior o por saturación de cationes. Por ejemplo, las esmectitas dioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1.50-1.52 angstroms, mientras que las esmectitas trioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1.53-1.54 angstroms.

En el caso de la identificación de vermiculita, esta puede ser problemática debido a que sus características varían, la mayoría de las vermiculitas saturadas e hidratadas con Mg producen un pico de 14 angstrom (001) que no se expande en la solvatación con etilenglicol. El pico (001) de vermiculita dioctaédrica se colapsa a aproximadamente 12 angstrom después de calentar a 400°C y a aproximadamente 11 angstroms después de calentar a 550°C.

Los minerales de arcilla de capa mixta son materiales en los que diferentes tipos de capas de arcilla se alternan entre sí. La mezcla o interestratificación en

apilamiento vertical puede ser regular (ordenada), segregada regular o aleatoria. Las arcillas de capa mixta comúnmente descritas incluyen: illitvermiculita, illita-esmectita, clorita-vermiculita (corrensita), clorita-esmectita, y caolinita-esmectita. Las arcillas de capa mixta pueden formarse debido a la intemperie que implica la eliminación o captación de cationes (por ejemplo, K), la alteración hidrotérmica o la eliminación de las capas intermedias de hidróxido. Las estructuras regularmente interestratificadas se identifican fácilmente por su reflexión basal (001), que corresponde a la suma de las separaciones de los componentes individuales y los picos subsiguientes de órdenes integrales superiores. Por ejemplo, la esmectita illita interestratificada regularmente, cuando está saturada con Mg y glicolada, se caracterizaría por un pico de difracción (001) a aproximadamente 27 angstroms, que corresponde a la suma de las separaciones de illita (10 angstroms) y esmectita (17 angstroms). A la inversa, las estructuras interestratificadas al azar tienen picos no integrales en posiciones intermedias entre los picos de las capas minerales individuales.

2.4.5 Análisis Térmico Diferencial (ATD)

Las muestras previamente molidas y secadas a 105°C fueron analizadas en un equipo NETZ 5CH para Análisis térmico simultáneo, modelo STA 409. El intervalo de temperatura de temperatura ambiente hasta 1000°C, a razón de 10°C/min. Se utilizó atmosfera sintética de oxígeno.

2.4.6 Ensayo R3

Este método es una nueva prueba rápida, pertinente y fidedigna denominada *R³ (rapid, relevant and reliable)* para predecir la actividad del puzolánica de arcillas calcinadas. Este ensayo ha sido validado para un numeroso grupo de arcillas calcinadas y se basa en medir el calor total liberado por la reacción puzolánica en un medio que simula el entorno químico de la arcilla calcinada en la solución de poros de un sistema mezclado cemento – puzolana. El calor liberado durante un período de tiempo determinado es directamente proporcional a la reactividad puzolánica de los productos de calcinación.

Para la realización del ensayo R³ se preparan 50 g de una mezcla sólida con relación másica Ca(OH)₂/arcilla calcinada 3:1. Posteriormente se disuelven

0,31 g de KOH y 1,47 g de K₂SO₄ en 60 g de agua destilada, para garantizar una concentración de álcalis y sulfatos semejante a la de una pasta de cemento con 30 % de sustitución por arcilla calcinada. La pasta se prepara mezclando ambos componentes a 1300 rpm durante 2 minutos, a una relación agua/sólido igual a 1,2 para asegurar un exceso de agua para la reacción de hidratación y obtener además una adecuada laborabilidad de las pastas. De cada mezcla se colocan 15 g en frascos de vidrio, los cuales son tapados y posteriormente colocados en un calorímetro isotérmico. El ensayo se realiza a una temperatura de 40 °C durante 5 días. Se emplea agua destilada como referencia para cada una de las muestras y se toman lecturas cada 60 segundos utilizando un ordenador conectado al calorímetro. Las curvas de flujo de calor registradas se normalizan a la masa de puzolana e integradas para convertirlas en curvas de calor total liberado en el tiempo.

2.4.7 Determinar la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet

El resultado de ensayos con más de 80 tipos de arcillas de Europa, América y en Cuba se ha establecido una ecuación de correlación para determinar la resistencia a la compresión en morteros estandarizados para una dosificación de PPC30 a partir de los contenidos de caolín equivalente (ver Figura 18). Un sistema PPC30 hace referencia a un sistema que contiene 30% de sustitución arcillas calcinadas, 65% de clínquer y 5% de yeso.

$$Y(90 \text{ días}) = 0.413x + 38.409, R^2 = 0.9011$$

$$Y(28 \text{ días}) = 0.45x + 34.505, R^2 = 0.9118$$

$$Y(7 \text{ días}) = 0.3363x + 27.879, R^2 = 0.9236$$

$$Y(3 \text{ días}) = 0.1483x + 22.52, R^2 = 0.9297$$

$$Y(1 \text{ día}) = 0.0899x + 11.198, R^2 = 0.9585$$

Figura 18 - Formulas del método para determinar la resistencia a la compresión a partir de (Avet et al., 2016)

2.4.8 Metodología de Almenares Reyes

Para determinar el potencial de las arcillas como Material Cementicio Suplementario (MCS) se utilizará la metodología propuesta por el MsC. Ing. Roger Samuel Almenares Reyes en 2017 en el trabajo: "Potencialidades de Arcillas Caolínicas Cubanas para la obtención de Materiales Cementicios Suplementarios".

Dicha clasificación se realiza sobre la base de su composición química y mineralógica y consta de los siguientes pasos:

Paso 1. Toma y preparación de la muestra

Se toma una muestra representativa del depósito de arcilla. Esta se homogeniza y se muele hasta obtener un 100 % pasado por el tamiz 74 μm .

Paso 2. Determinación de la composición química

Se determina la composición química mediante procedimientos normalizados. Los métodos, técnicas, y equipos deben estar sustentados bajo requisitos establecidos para el análisis químico de minerales.

Paso 3. Selección preliminar sobre la base de criterios químicos

El material arcilloso con cualidades para ser empleado como fuente de materia prima para la obtención de MCS debe cumplir con los requisitos que se presentan en la Tabla 3. En caso de que no cumpla con estos criterios se descarta el material para estas aplicaciones y no se continúa su proceso de evaluación.

Tabla 3 - Criterios establecidos para la selección preliminar basado en la composición química.

Al_2O_3	CaO	SO_3	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	PPI
>18,0 %	<3,0 %	<2,0 %	>0,3	>7,0 %

Paso 4. Determinación de la pérdida de masa asociada a la deshidroxilación

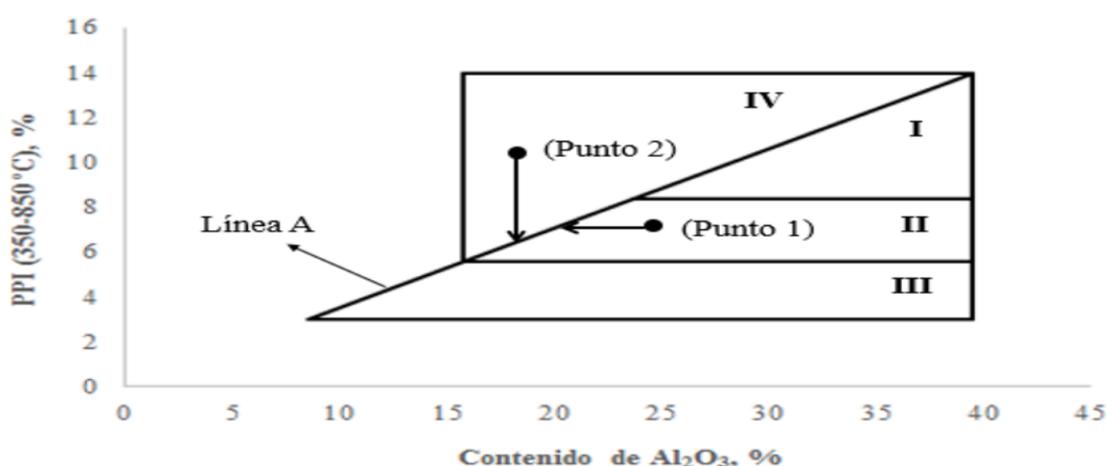
Se determina la pérdida de masa asociada al proceso de deshidroxilación, expresada como PPI (350-850°C) mediante la Ecuación 1, que toma el peso a 200°C como punto de referencia, teniendo en cuenta que muchos materiales

arcillosos exhiben pérdidas de masa asociadas al agua absorbida y adsorbida hasta temperaturas cercanas a los 200°C. Los valores identificados en la ecuación se toman sobre la base de los resultados de ATG.

Ecuación 1 - Ecuación para la determinación de la pérdida de masa asociada al proceso de deshidroxilación o PPI(350-850°C)

$$PPI(350 - 850) = \frac{m(350^{\circ}C) - m(850^{\circ}C)}{m(200^{\circ}C)} \cdot 100$$

Paso 5. Determinación de las potencialidades del depósito arcilloso A partir del conocimiento de la composición química y la pérdida de masa correspondiente a la deshidroxilación

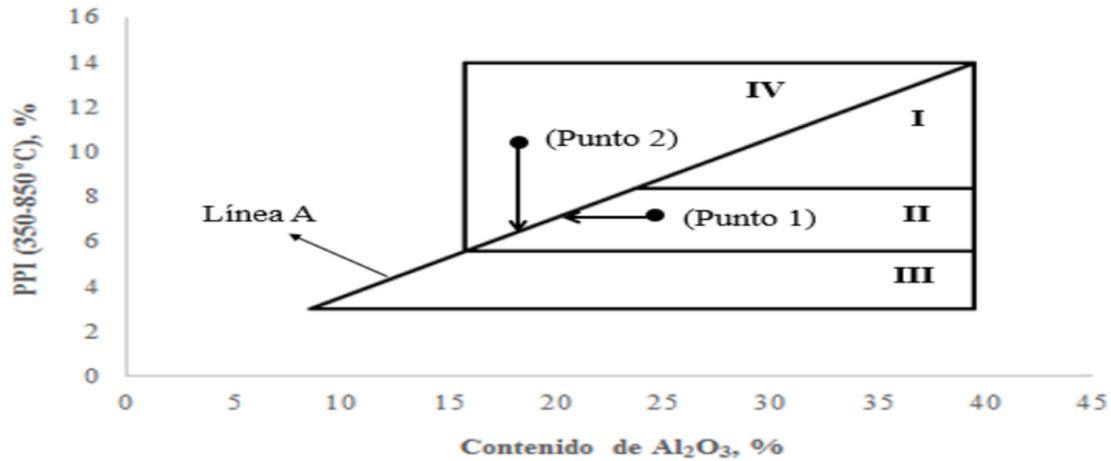


Tipo	Composición	Potencial
I	%K ^E >60	Alto
II	60>%K ^E >40	Bueno
III	%K ^E <40	Moderado
IV	Contenido variable de K ^E , contaminadas con minerales no arcillosos, relativamente abundantes, térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos (carbonatos, sulfuros, sulfatos)	Debe valorarse de manera individual

Figura 19 - Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos.

Se procede a la representación gráfica de estos datos. Si el material se encuentra en la zona I se considera como de alto potencial. Cuando se ubica en la zona II indica un buen potencial mientras que si se ubica en la zona III presenta un potencial moderado. Las muestras que se localizan en la zona IV deben valorarse de manera individual para corregir su contenido de minerales

arcillosos expresados como K^E . En la



Tipo	Composición	Potencial
I	$\%K^E > 60$	Alto
II	$60 > \%K^E > 40$	Bueno
III	$\%K^E < 40$	Moderado
IV	Contenido variable de K^E , contaminadas con minerales no arcillosos, relativamente abundantes, térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos (carbonatos, sulfuros, sulfatos)	Debe valorarse de manera individual

Figura 19 - Procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos. se representa el procedimiento para la evaluación preliminar de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de MCS, en forma de diagrama de bloque.

2.4.5.1- Cálculo de caolín equivalente (K^E)

Para el cálculo del caolín equivalente se utilizaron los parámetros expresados en las ecuaciones dos y tres. Los valores de pérdida de masa a las diferentes temperaturas fueron extraídos de los termogramas obtenidos.

Ecuación 2 - Cálculo caolín equivalente

$$K^E = \frac{PPI(350 - 850)}{13,96} * 100\%$$

CAPÍTULO III - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los principales resultados derivados del análisis de la composición química y mineralógica de las arcillas estudiadas y se aplica el criterio de clasificación expuesto anteriormente para la evaluación de su potencial como MCS.

3.2 Resultados del análisis químico

En la (Tabla 4) se observan los resultados del análisis químico de la muestra compósito obtenida en Farallones. Se analizaron doce elementos químicos, diez se expresaron en el contenido de sus óxidos y dos como elementos químicos. Todas las concentraciones de elementos químicos necesarios para la aplicación del criterio de clasificación se comportaron dentro de los límites establecidos.

Un análisis detallado de las concentraciones permite detectar que los contenidos de sodio, magnesio y manganeso son bajos, estos elementos tienen baja movilidad geoquímica y por lo general no suelen concentrarse en este tipo de cortezas de meteorización. Los contenidos de Al_2O_3 (20,54%) y SiO_2 (46,28%) presentan valores elevados, debido a la abundancia de aluminosilicatos en estas arcillas, lo cual es positivo para la fabricación de MCS.

Tabla 4 - Composición Química de elementos mayoritarios expresado en volumen total de óxidos.

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	S*	C*
FR	0,29	1,68	20,54	46,28	0,01	0,86	0,34	0,88	0,10	10,96	0,03	1,48

* los contenidos de azufre y carbono están expresados como elementos y no como óxidos.

Ante la baja concentración de CaO (0,34%) en las muestras, el elevado contenido de carbono (1,48%) está asociado a la materia orgánica, esto es provocado por la abundante cobertura vegetal que existe en la zona, la profundidad a la que se realizó el muestreo, el origen vulcanógeno-sedimentario de la roca madre y por el origen residual de las arcillas en

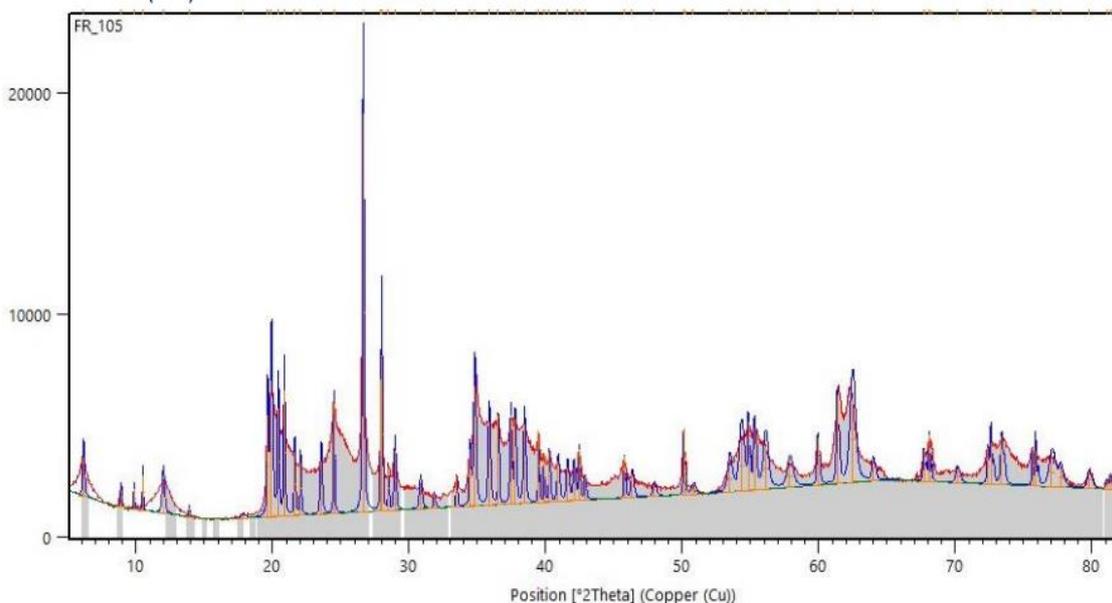
cuestión. Los contenidos de K_2O (0,86%) en la muestra son aportados por el mineral moscovita, pues no se pudo detectar la presencia de feldspatos potásicos en la muestra.

La presencia de clorita en la muestra provoca los elevados valores de Fe_2O_3 y justifica la presencia MgO , el cual tiene una baja concentración. A pesar de que los valores de Fe_2O_3 son relativamente elevados, son menores que los de otras cortezas arcillosas reportadas en el municipio de Moa, donde los valores de este óxido suelen sobrepasar el 20%. El bajo contenido de azufre se comportó dentro de lo esperado pues la zona no tiene reportes de actividad hidrotermal.

3.3 Resultados de la difracción de rayos X (DRX y DRXD)

Los máximos reflejos en la zona de 7.14 a 7.64 angstroms no permiten hacer una clara definición de los minerales del grupo del caolín presentes, algo similar ocurre en la zona de los 5.58 angstroms, sin embargo, el colapso de estos reflejos durante la calcinación a $550^\circ C$ muestra la presencia de estos minerales (ver Figura 20).

Se asumen reflejos de menor intensidad para establecer la presencia de minerales del grupo del caolín. Las illitas dan reflejos típicos en la zona de los



10 angstroms, que persisten luego del tratamiento térmico. Se identificaron los reflejos 9.93, 4.47, 3.35 y 2.59 angstroms, que permiten hacer una diferenciación para la moscovita. Por otro lado, se observan reflejos alrededor de los 15 angstroms, no bien definidos, que combinados a un reflejo débil cerca

de los 5.01, y reflejos a los 4.50 y 2.59 angstroms, permiten establecer la presencia de montmorillonita. Esto encaja con el hecho de que el tratamiento con glicol reveló un hinchamiento hasta los 16.68 angstroms.

Figura 20 - Gráfica de DRX

Tabla 5 - Fases minerales identificadas

No	Fases Minerales	Fracción no arcillosa	Fracción Arcillosa
1	Cuarzo	X	
2	Moscovita	X	X
3	Vermiculita	X	X
4	Clorita	X	X
5	Nacrita	X	X
6	Albita	X	
7	Ilita	X	X
8	Caolinita	X	X
9	Montmorillonita	X	X

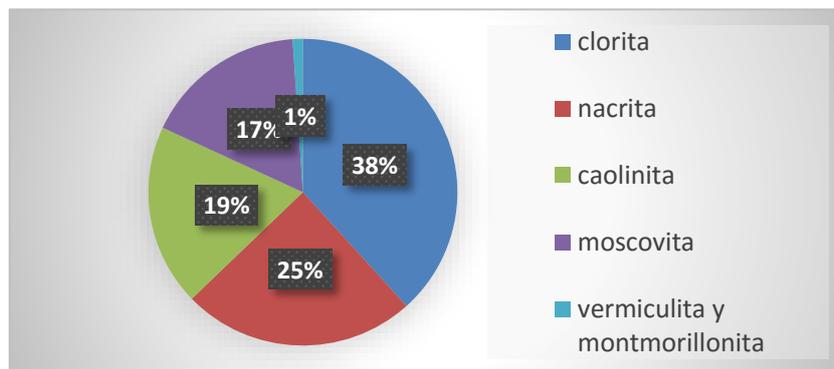


Figura 21 - Distribución porcentual de las fases arcillosas

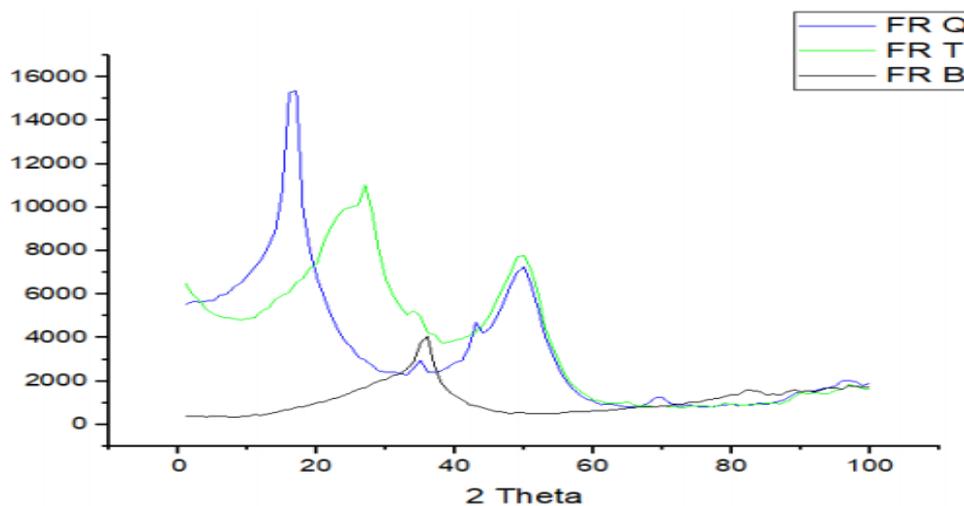


Figura 22 – Curvas de DRXD

3.4 Resultados del análisis térmico diferencial (ATD)

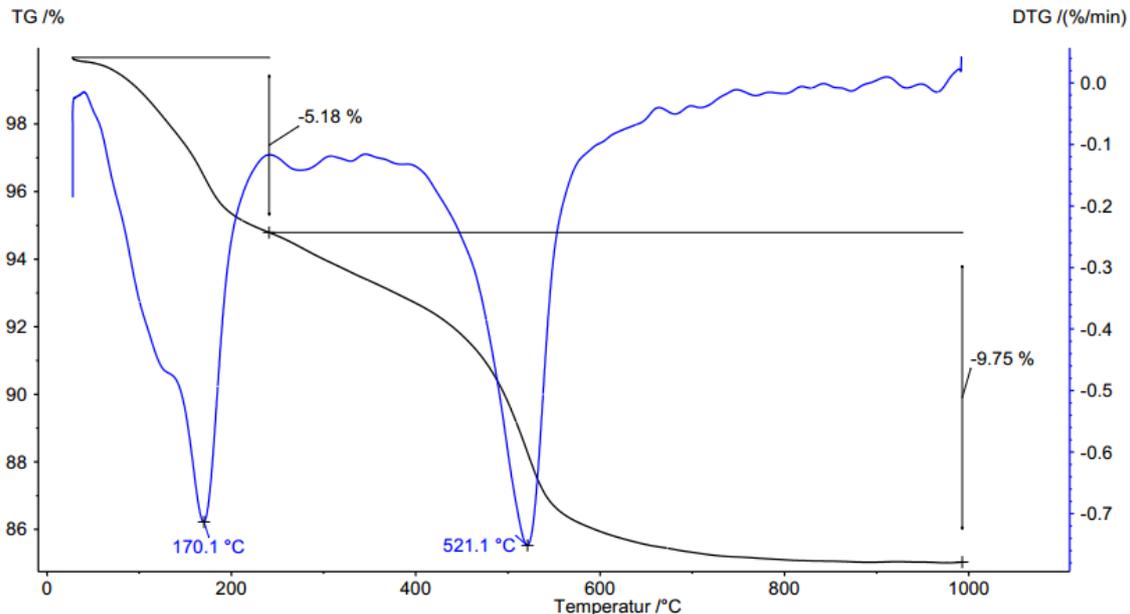


Figura 23 - Curva de Análisis Térmico Diferencial

En la gráfica se observa una pérdida de masa en dos momentos, el primero en el rango anterior a los 200°C asociado a la pérdida de agua estructural de los diferentes minerales arcillosos. Este efecto es especialmente intenso por la presencia de cloritas y vermiculita. El efecto endotérmico pronunciado entre los 400 y 700°C está relacionado con la desidroxilación de los grupos caolinita, illita y vermiculita. El sistema de efectos exo-endotérmicos entre los 800-1000°C a pesar de ser de baja intensidad, probablemente estén relacionados con la presencia de montmorillonita en la muestra.

3.5 Resultados del cálculo de caolín.

Como se muestra en la

Tabla 6, las arcillas verdes desarrolladas sobre tobas zeolitizadas muestran un contenido de caolín equivalente promedio de 61,71%, lo cual supera con amplio margen el mínimo de 40% establecido por Roger Samuel Almenares

Reyes, 2017. Los valores de pérdida por ignición también son favorables presentando un promedio de 8,61 aproximadamente.

Tabla 6- Resultados de la calcinación

PPI 750	PPI 800	PPI 850
8,54244907	8,36186435	8,66877006
K ^E 750 ° C	K ^E 800 ° C	K ^E 850 ° C
61,1923286	61,8328392	62,0972067

3.6 Resultados de la reactividad puzolánica según el método R³

Las curvas de calor total aculado fueron tomadas solo para un periodo de 25 horas(ver Figura 24 - Curva de calorimetría isotérmica) pues se conoce que es en las primeras 24 horas que ocurre las principales reacciones de hidratación en los cementos y el objetivo principal de la realización de este análisis es la comparación de la reactividad a las tres temperaturas de calcinación.

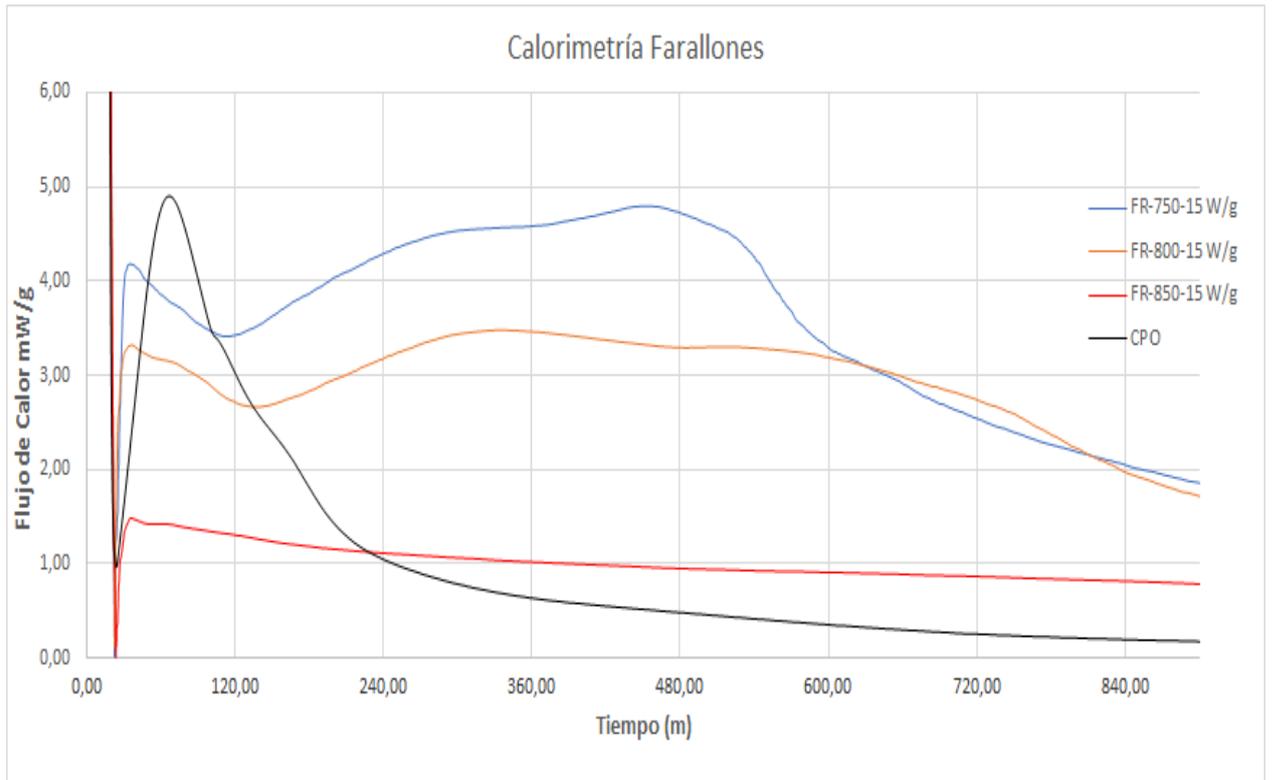


Figura 24 - Curva de calorimetría isotérmica

De manera general en las muestras se observa una marcada tendencia a la disminución de la reactividad puzolánica a medida que aumenta la temperatura de calcinación, al punto que la muestra calcinada a 850°C no muestra valores de reactividad. Esto se debe fundamentalmente a que la fase arcillosa predominante en la muestra es la clorita y no la caolinita, y esta situación interfiere con la formación de los principales productos de hidratación (halita, velita y finalmente ettringita), provocando además un retraso significativo en las reacciones químicas que dan lugar a esos productos.

Como se observa en el gráfico, en el CPO las reacciones de hidratación ocurren en el rango de las dos primeras horas mientras que, en las muestras analizadas, este proceso se extiende hasta alrededor de las diez horas, por lo que se puede decir que el fraguado es lento y provoca que no se formen suficientes producto de hidratación.

Los valores de calor total acumulado son bajos en comparación con otras arcillas estudiadas y con los valores mostrados por el CPO, observándose sus mayores valores para la muestra de arcilla calcinada a los 750°C.

3.7 Resultados de la estimación de la resistencia a la compresión en morteros para una dosificación de PPC30

Al aplicar el método de correlación entre la resistencia a la compresión de los morteros y el contenido de caolín equivalente se logró estimar el comportamiento de este parámetro para muestras con sustitución de un 30% de arcillas calcinadas.

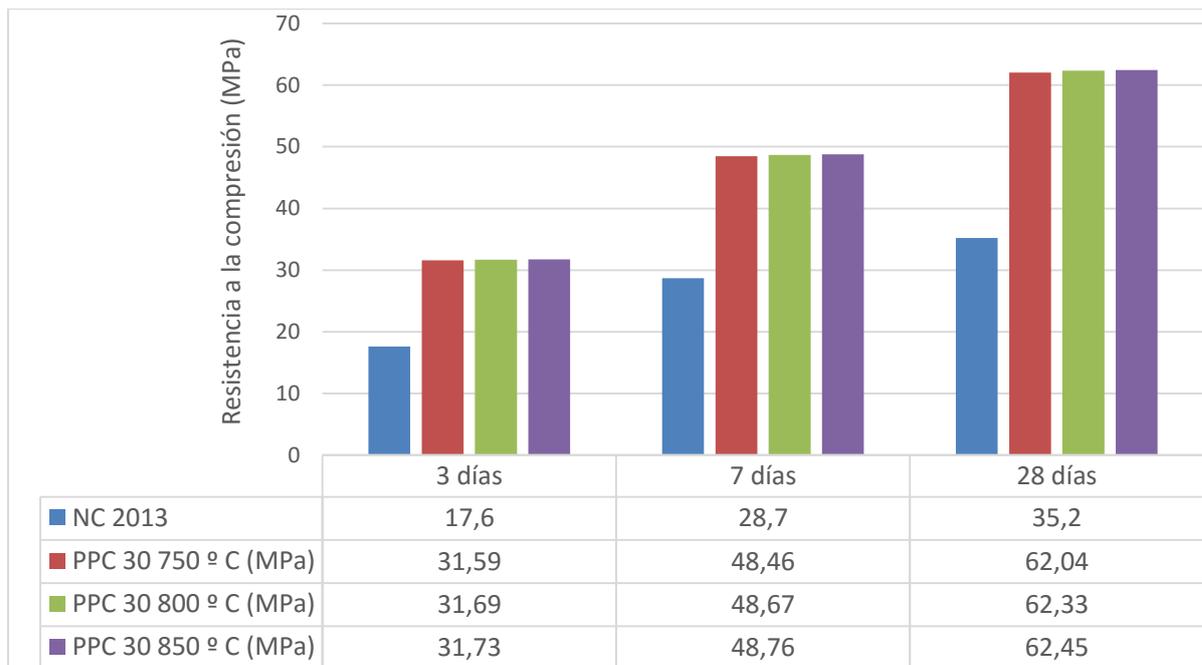


Figura 25 – Determinación de la resistencia a la compresión por el método de (Avet et al., 2016)

Se observa que en todas las edades la resistencia a la compresión se encuentran por encima de la norma cubana del 2013 lo cual es positivo para la fabricación de cementos puzolánicos, y aunque la tendencia es a aumentar la resistencia con el aumento de la temperatura de activación, la variación es muy poca, y el mayor valor de resistencia es de 62,45 MPa y se obtienen a los 850°C y a la edad de 28 días.

A pesar de que el mayor valor de resistencia a la compresión se obtiene al someter a las arcillas a una activación de 850°C, se conoce que los valores de caolín equivalente, que es la base fundamental sobre la cual se sostiene la estimación, están influenciados por la descomposición en ese intervalo de temperatura de otros minerales como la clorita y la moscovita, los cuales son

minerales mayoritarios en la fracción arcillosa y aumentan el valor de la deshidroxilación.

Dado que el aumento de la resistencia a la compresión varía muy poco entre las tres temperaturas de activación y los mayores valores de reactividad puzolánica se obtiene a los 750°C, se toma esta temperatura como el valor óptimo para la calcinación.

3.8 Aplicación del procedimiento de Almenares Reyes 2016 en la evaluación de las manifestaciones arcillosas como fuente de MCS

A partir de los resultados de la composición química que se presentan en la Tabla 7 - Tabla comparativa para criterio de clasificación., se confirma que la muestra del compósito FR cumple con los requisitos establecidos en el paso 3 del procedimiento descrito en el acápite 2.4. Por lo tanto, se considera conveniente continuar su evaluación como fuente de MCS.

Tabla 7 - Tabla comparativa para criterio de clasificación.

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	SO ₃	Al ₂ O ₃ / SiO ₂	PPI(750°C)	PPI(750°C)	PPI(750°C)
Criterios	≥18	≥3	≤3	≤2	≥3	≥7	≥7	≥7
Límites								
FR	24,17	54,45	0,4	0,03	0,44	8,54	8,63	8,67

Los valores de pérdida por ignición al igual que los de K^E se evaluaron de forma individual para los 750°C, 800°C y 850°C, pues la muestra se encontraba contaminada con minerales térmicamente activos los cuales se descomponen también en el mismo rango que los minerales arcillosos aumentado así los valores de PPI y por consiguiente los K^E.

La representación gráfica (ver Figura 26) y el contenido de K^E superior al 60% permite ubicar la muestra analizada en el grupo IV de la clasificación desarrollada por Almenares Reyes (2017), caracterizándola como una arcilla con contenidos variables de caolín equivalente, contaminadas con minerales, no arcillosos relativamente abundantes, térmicamente activos, que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos.

La evaluación para el uso de este tipo de arcillas debe hacerse de forma individual para cada caso específico.

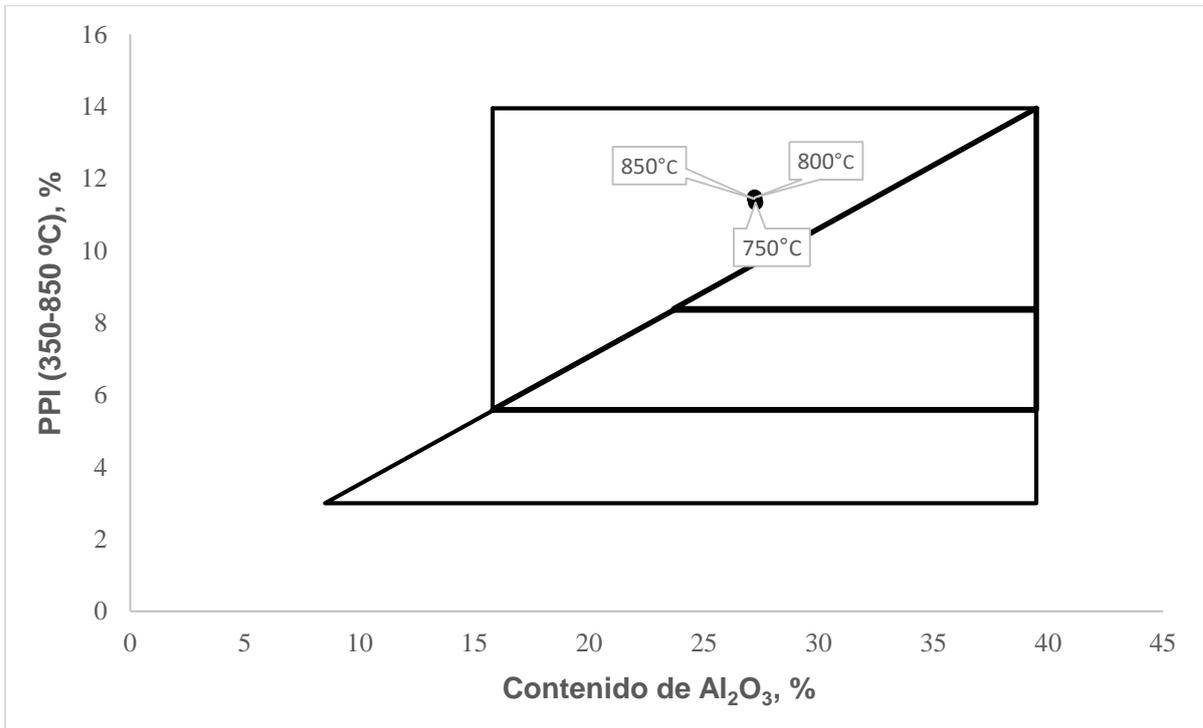


Figura 26 - Ubicación en el gráfico PPI (350-850 °C) vs. Al_2O_3 del compuesto FR.

CONCLUSIONES

- Se logró realizar la caracterización química y mineralógica de la muestra de arcilla, obteniéndose como fases arcillosas principales las siguientes: clorita 36%, nacrita 23%, caolinita 18%, moscovita 16%, vermiculita y montmorillonita 1%, y como fases minerales acompañantes el cuarzo, la moscovita y albita.
- Se logró realizar la caracterización geoquímica de la muestra determinándose que en todos los casos los contenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el criterio de clasificación de Almenares Reyes 2017.
- Se evaluaron las pérdidas por deshidroxilación y el cálculo de caolín equivalente obteniéndose como los valores promedios 8,61% y 61,71% respectivamente.
- A pesar de que los valores más altos de resistencia a la compresión (62,45 MPa) se obtienen a los 28 días y una temperatura de 850°C, se considera a 750°C como la temperatura óptima de activación.
- La aplicación de la metodología de Roger Samuel Almenares Reyes, 2017 permite ubicar a las arcillas estudiadas en el grupo 4, lo cual la clasifica como arcilla con un potencial variable para ser empleado como fuente de MCS.

RECOMEDACIONES

- Profundizar en el estudio del efecto de la clorita como mineral predominante en la fracción arcillosa, sobre la formación de los principales productos de hidratación.
- Realizar una caracterización completa de la roca madre.
- Realizar morteros para evaluar los valores reales de resistencia a la compresión a las diferentes temperaturas de activación.

BIBLIOGRAFÍA

- AÏTCIN, P.-C., 2000. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1349-1359.
- ALMENARES REYES, R.S. y ALMENARES, R., 2017. *Potencialidades De Arcillas Caoliníticas Cubanas Para La Obtención De Materiales Cementicios Suplementarios*. Moa: Universidad Central Marta Abreu De Las Villas.
- ALMENARES REYES, R.S., ALUJAS DÍAZ, A., POLL LEGRÁ, L., BASSAS NOA, P.R., BETANCOURT RODRÍGUEZ, S., MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F., LEYVA-RODRÍGUEZ, C.A., ALMENARES REYES, R. S. ALUJAS DÍAZ, A., POLL LEGRÁ, L., BASSAS NOA, P. R. BETANCOURT RODRÍGUEZ, S., MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F. y LEYVA-RODRÍGUEZ, C.A., 2016. *Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC 3)*. Octubre-Diciembre. 2016. Cuba: s.n.
- ALONSO, S. y PALOMO, A., 2001. Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 1, pp. 25-30.
- ALUJAS DÍAS, A., ALUJAS, A. y ALUJAS DÍAS, A., 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes*. S.I.: Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas.
- ALVAREZ, A., 2013. *Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico* Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico. Instituto Superior, Moa. , pp. 73.

- ANDERSEN H.J. JAKOBSEN, AND J. SKIBSTED, M.D., 2003. Incorporation of Aluminum in the Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) of Hydrated Portland Cements: A High-Field ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR Investigation. *Inorganic Chemistry*, 42. ,
- ANDRÉS, I. 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. ,
- AVET, F., SNELLINGS, R., ALUJAS, A., BEN, M., SCRIVENER, K., ALUJAS DIAZ, A., BEN HABA, M., SCRIVENER, K., ALUJAS, A., BEN, M. y 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*, vol. 85, pp. 1-11. DOI 10.1016/j.cemconres.2016.02.015.
- BARONIO, G. y BINDA, L., 1997. Study Of The Pozzolanicity Of Some Bricks And Clays. *Construction And Building Materials*, vol. 11.
- BATISTA, R., 2007. *Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba*. S.I.: UCLV: Marta Abreu de Las Villas.
- 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*. Santa Clara: Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.

- CHACÓN MOREIRA, M., CHACÓN, M. y CHACÓN MOREIRA, M., 2015. Evaluación de mezclas de materiales arcillosos de la zona de Cayo Guam y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica. [en línea], pp. 85. [Consulta: 23 marzo 2019]. Disponible en: nive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1409.
- CISNERO PALACIO, A., 2010. *Caracterización Geoquímica De Las Cortezas De Meteorización Alíticas En Cuba Oriental: Zonas De Moa-sagua De Tanamo*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. y ZUSSMAN, J., 1992. *An introduction to the rock-forming minerals*. S.I.: Longman Scientific & Technical Hong Kong.
- DRITS, V.A., 2003. Structural and chemical heterogeneity of layer silicates and clay minerals. *Clay Minerals*, vol. 38, no. 4, pp. 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*. S.I.: 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'Ingeniur*. Lausanne: École Polytechnique Federale de Lausanne.
- FERNANDEZ, R., 2008. *Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries*. 2008. S.I.: Laboratory of Construction Materials.
- 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*. 2012. S.l.: s.n.

GYARMATI, P. y LEYÉ O´CONOR, J., 1990. Informe final sobre los trabajos de levantamiento geológico en escala 1:50 000 y búsqueda acompañante en el polígono CAME V, Guantánamo. O. N. R. M. . S.l.:

HABERT, G., BILLARD, C., ROSSI, P., CHEN, C. y ROUSSEL, N., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 5, pp. 820-826.

HAMILTON SUÁREZ, M., 2015. *Evaluación de la vulnerabilidad por deslizamientos de taludes y laderas del consejo popular Farallones del municipio Moa*. S.l.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

HE, C., OSBAECK, B. y MAKOVICKY, E., 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1691-1702.

HENDRIKS, C.A., WORRELL, E., JAGER, D., BLOK, K., RIEMER, P., DE JAGER, D., BLOK, K. y RIEMER, P., 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies*. Interlaken, Suiza: s.n., pp. 939-944. DOI 10.1016/B978-008043018-8/50150-8.

HERRERA DEL SOL, D., 2018. *Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC3*. S.l.: Universidad Central Marta AbreuLas Villas.

IGP, 2010. *Arcillas caoliniticas cubanas. Estado Actual*. S.l.: s.n.

JOHN, V.M., 2003. On the sustainability of concrete. ,

JUVENTUD REBELDE, 2007. Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo.
Juventud Rebelde. Cuba, 2007.

LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE CUBA, 2013. Instituto Cubano de Geología y
Paleontología. *La Habana. Cuba,*

MACPHEE D. E. LODEIRO I. G, S.S., 2010. Alternative Cementitious binders
chemical perspectives. ,

MARTIRENA, F., MARTIRENA HERNANDEZ, F. y 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.* Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Universidad
Central «Marta Abreu» de las Villas.

MARTIRENA, J.F., 2011. *Reporte sobre Estudio de factibilidad para la
producción de metakaolín en Cuba.* 2011. S.I.: Cuba.

MASSAZZA, F., 1976. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements.,
ILCemento, vol. 1, pp. 3-38.

MASSAZZA, F., 1993. Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites.
, pp. 185-214.

MATOS PÉREZ, C.A. y DUNAN ÁVILA, P.L., 2017. Potencialidades de las
Arcillas del municipio Guamá, Santiago de Cuba, para su utilización como
Material Cementicio Suplementario. . S.I.:

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. S.I.: Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas.

MURRAY, H.H., 2000. *Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview*. S.I.: s.n.

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*. 2014. S.I.: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

NIJILA, T., MARTINES, R. D., FERNANDEZ, J. P. & MELGAR, G.O., NIJILA, T., MARTÍNEZ, R.D., FERNÁNDEZ, J.P. y MELGAR, G.O., 2010. Evaluación Mineralógica semi-cuantitativa de las cortezas de meteorización no níquelíferas en la región nororiental de Cuba, (January). . S.I.:

NJILA, T., 2016. Estudio Químico-mineralógico De Los Perfiles Lateríticos Ferrosialíticos En Los Sectores Téneme. , pp. 67-83. DOI 10.15517/rgac.v54i0.21149.

OLIVA, G., 1899. *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Instituto de Geografía, 132. ,

ONEI, 2012. *INDUSTRIA MANUFACTURERA*. 2012. S.I.: s.n.

POON, C.-S., LAM, L., KOU, S.C., WONG, Y.-L. y WONG, R., 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1301-1306.

QUINTANA, 2005. *Relación Entre Las Propiedades Geotécnicas Y Los Componentes Puzolánicos De Los Sedimentos Pampeanos*. S.I.:

Tesis en opción al Título de Ingeniero Geólogo

Universidad Nacional de Córdoba.

RABILERO, A., 1993. Una contribución al estudio del aglomerante cal-puzolana. Reporte al IX Forum de Ciencia y Técnica. Havana. Cuba. ,

RAMACHANDRAN, V.S. y BEAUDOIN, J.J., 2000. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications*. S.I.: Elsevier. ISBN 0815517386.

SABIR, B.B., WILD, S. y BAI, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 23, no. 6, pp. 441-454. DOI [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5). Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946500000925>.

SAMET, B., MNIF, T. y CHAABOUNI, M., 2007. *Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement*. 2007. S.I.: s.n.

SÁNCHEZ, Y., 2005. Constitución geológica del área de Farallones sobre la base de la escala 1:25 000. 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba. . S.I.:

SCHNEIDER, M., ROMER, M., TSCHUDIN, M. y BOLIO, H., 2011. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 642-650.

SCRIVENER, K., 2007. *Durability course*. EPFL, Switzerland. 2007. S.I.: s.n.

SHI, C. y DAY, R.L., 2001. Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 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*. S.I.: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
- SOUZA, P.S.L. y DAL MOLIN, D.C.C., 2005. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. *Cement and Concrete Research* [en línea], vol. 35, no. 10, pp. 1993-1998. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.012>. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605000876>.
- TAYLOR, H.F.W., 1997. *Cement chemistry*. S.I.: Thomas Telford. ISBN 0727725920.
- TIRONI, A., 2013. *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*. Cuba: s.n.
- TODOR, D.N., 1976. *Thermal analysis of minerals*. S.I.: Abacus press. ISBN 0856261017.
- VERA LAZCANO, M.A.A., 2018. *Evaluación de la actividad puzolánica y comportamiento térmico de las arcillas del yacimiento Yaguajay como materia prima para la producción de cemento de bajo carbono*. S.I.: Universidad Central Marta AbreuLas Villas.
- VIZCAÍNO, L.M., 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer - arcilla calcinada -caliza*. Santa Clara: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.