

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de la calcinación semi-industrial de arcilla del yacimiento Neptuno en Artemisa para la producción de una adición mineral activa a base de arcilla calcinada, yeso y caliza (LC²).

Autor: Suset Casales Hernández.

Tutor: Ing. Eilys Valdés Alemán.

Consultante: Dr. Adrián Alujas Díaz.

Santa Clara.

2017

Es necesario desarrollar el espíritu de observación, la capacidad de analizar y de indagar, es decir, no hacer las cosas simplemente sin hacer un razonamiento porque aparece en un libro o porque se lo dicen.

Fidel Castro Ruz

A la memoria de mis abuelos maternos, que aunque no estén presente físicamente, son la razón de todos mis logros.

A mi mamá por ser tan especial en mi vida, por su amor y dedicación, por su esfuerzo y sacrificio, por guiarme y ayudarme a cumplir mis sueños sin importar el momento, el lugar ni el tiempo.

A mi papá, por ser un padre incondicional, por tener un sí en todo momento y sacrificar su vida por ver mejor la mía.

A mi hermano Jorge por hacer que cada día junto a él sea un día lleno de amor y felicidad.

A mi hermano Yudiel, por brindarme su amor, cariño y dedicación.

A mis tías Felicia, Maira y Luisa por su apoyo sin límites por buenos o malos que sean los momentos, sin interesar la distancia ni el tiempo.

A mis primas Misukoo y Yanisuleidys, que siempre han estado a mi lado pendientes de mí, brindándome toda su ayuda en cada etapa de mi vida.

A mis primos Cristian y Noslen, que de una manera u otra han sido protagonistas de todos mis logros.

A Roberto por estar pendiente de mí en estos últimos tiempos y brindarme su amor incondicional.

A Consuelo por estar al tanto de todos mis problemas y apoyarme en momentos difíciles.

A mis amistades Yanita, Zaday y Melissa, por siempre estar ahí dándome su ayuda y apoyo en los momentos más difíciles.

A Mary y Tony por su gran ayuda y preocupación en todos los tiempos.

A Carmencita por brindarme siempre su ayuda en estos años de estudio.

A Mayelín por su preocupación durante los últimos años de mi vida estudiantil.

A Adita por ser mi guía en los primeros años de la carrera.

A mis amigas Lisbetty, Leidys, Blasa y Claudia, por ser mis consejeras durante estos cinco años y estar siempre juntas por muy difíciles que hayan sido los tiempos.

A Lázaro, Alejandro y Reinier por ser mis compañeros de estudio en estos cinco años y brindarme su ayuda siempre que fuese necesaria.

A mi tutora Eilys por su ayuda, apoyo y dedicación en estos tiempos tan estresantes.

A Adrián por su responsabilidad, esfuerzo y atención incondicional.

A Yisel por su ayuda indispensable en todo este tiempo.

A Dairán por su atención y paciencia sin importar el momento en que fuese necesario su ayuda.

A Elizabeth por su disposición y horas dedicadas.

A todos los profesores que de una forma u otra participaron en mi formación como profesional en el transcurso de la carrera.

A todas aquellas personas que han sido protagonistas de mis logros y esfuerzos y han hecho posible que hoy llegue hasta aquí, Muchas gracias!!!

El empleo de los materiales cementicios suplementarios, es en la actualidad una de las opciones más factible en la reducción de los grandes volúmenes de clínquer en la producción de cemento Portland, destacándose así el uso de las puzolanas, y con estas las arcillas calcinadas.

Con el propósito de desarrollar estos estudios, se ha realizado el siguiente trabajo investigativo que tiene como objetivo general determinar la temperatura de calcinación adecuada, para el empleo de las arcillas del yacimiento Neptuno, Artemisa en la producción de una adición mineral activa, a base de arcilla calcinada, yeso y caliza (LC²), en el mismo se realizan una serie de ensayos a estas arcillas calcinadas a tres temperaturas diferentes; 750°C, 800°C y 850°C, a las cuales se les realizó la caracterización química mediante la fluorescencia de Rayos X (FRX) y la caracterización en función de la finura a través del tamiz de 45- μ m. Se determinó la reactividad puzolánica mediante el ensayo de calorimetría isotérmica, así como el ensayo del Minicono con el propósito de evaluar la reología de las muestras, utilizando como referencia un patrón elaborado con cemento P-35. Además, se midió la resistencia a compresión de morteros normalizados a los 28 días tomando como patrón de referencia un mortero elaborado con cemento P-35. Todos estos estudios demostraron que las arcillas del yacimiento estudiado presentan grandes potencialidades como puzolanas y permitieron recomendar que la temperatura de calcinación idónea oscila entre los 750°C y los 800°C.

Palabras claves: arcilla calcinada, temperatura de calcinación, LC², reactividad puzolánica, comportamiento reológico y resistencia.

The use of supplementary cementitious materials is currently one of the most feasible options in reducing the large volumes of clinker in Portland cement production, highlighting the use of pozzolans and with these calcined clays. With the purpose of developing these studies, the following research was carried out with the general objective of determining the ideal calcination temperature for the use of Neptune and clay, gypsum and limestone (LC²), a series of tests are carried out on these calcined clays at three different temperatures; 750 ° C, 800 ° C and 850 ° C, to which the chemical characterization was performed by X-ray fluorescence and characterization as a function of fineness through the 45- μ m sieve. The pozzolanic reactivity was determined by the isothermal calorimetry test, as well as the Minicono test in order to evaluate the rheology of the samples, using as reference a standard made with P-35 cement. In addition, the compressive strength of normalized mortars at 28 days, using a cement-based mortar P-35. All these studies showed that the clays of the studied field present great potential as pozzolans and allowed to recommend that the ideal calcination temperature oscillates between 750°C and 800°C.

Keywords: Calcined clay, calcination temperature, LC², pozzolanic reactivity, geological behavior and resistance.

Contenido

Introducción	1
CAPÍTULO I. “Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario”	5
1.1 Producción de cemento Portland. Situación actual	5
1.1.1 Producción de cemento Portland en Cuba (Betancourt, 2012).	6
1.2 Impacto ambiental	7
1.2.1 Aire	7
1.3 Fabricación de CPO (Betancourt, 2012).....	9
1.4 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)	11
1.4.1 Definición y clasificación de los MCS	11
1.4.2 Las puzolanas, clasificación, factores positivos y negativos	12
1.4.3 Empleo a nivel mundial de los MCS	14
1.4.4 Evolución histórica del empleo de MCS en Cuba	16
1.5 Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario (MCS)	17
1.5.1 Características generales, composición química, estructura y clasificación	17
1.5.2 Activación térmica de las arcillas	18
1.5.4 Evaluación de la reactividad puzolánica.....	20
1.5.5 Las arcillas caoliníticas de bajo grado como fuente de MCS.....	22
1.5.6 Arcillas caoliníticas en Cuba. Potencialidades de utilización	23
1.6 Características específicas del LC³	24
1.7 Particularidades fundamentales del LC²	24
1.8 Conclusiones parciales del capítulo.....	24
CAPÍTULO II. “Características de los materiales y descripción de los métodos”	26
2.1.1 Extracción de la arcilla. Muestreo.....	26
2.2 Procesamiento de la materia prima	27
2.2.1 Activación térmica y proceso de calcinación	27
2.2.2 Molienda de la arcilla	28
2.3 Procedencia de las materias primas utilizadas en la elaboración de las mezclas	28
2.4 Caracterización de los materiales empleados en la investigación	29
2.4.1 Arcilla.....	29
2.4.1.1 Caracterización química	29
2.4.1.2 Caracterización de la finura por tamizado.....	29

2.4.2 Cemento P-35.....	31
2.4.3 Caliza	32
2.4.4 Yeso	33
2.4.5 Arena normalizada	33
2.4.6 Aditivo Dynamon SX 32.....	33
2.4.7 Agua	34
2.5 Diseño experimental de la investigación	34
2.5.1 Declaración de las variables y parámetros de estado	36
2.6 Series de estudio.....	36
2.7 Tipo de análisis estadístico	37
2.8 Descripción de los ensayos.....	38
2.8.1 Evaluación de la reactividad puzolánica mediante Calorimetría Isotérmica (Protocolo R3)..	38
2.8.1.1 Utensilios, equipos y materiales	38
2.8.1.2 Procedimiento	39
2.8.1.3 Proporciones	40
2.8.2 Evaluación del comportamiento reológico por el Método del Minicono	40
2.8.2.1 Utensilios, equipos y materiales	41
2.8.2.2 Procedimiento	41
2.8.2.3 Proporciones	42
2.8.3 Evaluación de la reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados	42
2.8.3.1 Utensilios, equipos y materiales	43
2.8.3.2 Procedimiento para la elaboración de las mezclas	43
2.8.3.3 Proporciones	44
2.8.3.4 Procedimiento para la confección de las probetas	44
2.9 Conclusiones parciales del capítulo.....	45
Capítulo III. “Análisis y discusión de los resultados”	46
3.1 Análisis de la caracterización química de la arcilla	46
Tabla 3.1. Caracterización química de la arcilla de yacimiento Neptuno, en Artemisa (CEMART, 2016)	46
3.2 Análisis de la finura de la arcilla a partir de la caracterización por el tamiz de 45-µm	47

3.3 Análisis de la reactividad puzolánica a través de la Calorimetría Isotérmica (Protocolo R³).....	47
3.4 Determinación de la plasticidad por el Método del Minicono.....	48
3.4.1 Análisis estadístico del ensayo del Minicono	50
3.5 Análisis de los resultados de resistencia a compresión de morteros normalizados	51
3.5.1 Análisis estadístico del ensayo de Resistencia a Compresión	52
3.6 Análisis de la influencia de la temperatura en la reactividad puzolánica y en el comportamiento reológico de las arcillas calcinadas	53
Conclusiones generales	55
Recomendaciones.....	56
Referencias Bibliográficas	57
Anexos	62

Introducción

El descubrimiento del Cemento Portland Ordinario (CPO) como material cementante ha sido uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción. Actualmente, es considerado como el material más usado en la industria de la construcción y uno de los principales contribuidores del desarrollo de la humanidad. Gracias a la abundancia de materias primas para su fabricación se estima una demanda de cemento de un 150% de crecimiento a nivel mundial. Sin embargo, por sus altos volúmenes de producción, su elaboración está asociada a un alto consumo energético y a grandes volúmenes de emisiones de CO₂ a escala global, fundamentalmente durante la producción del clínquer, factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental (Alujas, 2010b).

Con el fin de atenuar el incremento de las emisiones de CO₂ por la producción de cemento, se han propuesto una serie de soluciones dentro de las que se encuentran las orientadas a aumentar la eficiencia del proceso, disminuyendo el consumo de combustibles, y el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas, en la sustitución parcial del clínquer al CPO (Martirena, 2003).

Los altos volúmenes de emisión de CO₂ durante la producción de cemento se asocian fundamentalmente a la descarbonatación de las materias primas y a la quema de combustibles fósiles en la obtención del clínquer, el cual se encuentra en el CPO en proporciones cercanas al 90 %. De esta forma, para lograr satisfacer la demanda del CPO de una manera económica, energética y medioambientalmente sostenible se hace necesaria la implementación de procesos y tecnologías que permitan la reducción del contenido de clínquer en el aglomerante. Dentro de estas estrategias, la más prometedora a corto plazo es el empleo de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS), los cuales permiten disminuir el contenido de clínquer en el CPO, manteniendo o mejorando las propiedades del hormigón (Hendriks, 1998).

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, 2003). 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., 2009)

Especial atención debe prestarse al empleo de fuentes de materiales locales que se encuentren disponibles, en particular aquellas que permitan su utilización como fuente de materiales puzolánicos (Alujas, 2010b).

En Cuba, el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en la provincia de Villa Clara, ha estudiado en los últimos años, el empleo de las arcillas calcinadas como fuente de materiales cementicios suplementarios, estudios que tienen como propósito reducir la cantidad de emisiones de CO₂ en la producción del cemento. La combinación de arcillas calcinadas con caliza puede permitir niveles de hasta un 50% de sustitución de clínquer. Como resultado de estos estudios se ha desarrollado un tipo de cemento mezclado a partir de la combinación de clínquer, arcilla calcinada y carbonato de calcio en forma de piedra caliza (LC³); o lo que es lo mismo, cemento de bajo carbono; con fines de disminuir los porcentajes de clínquer en el cemento.

Evaluando la disponibilidad de las materias primas arcillosas, a partir de su valoración térmica y la posibilidad de ser utilizadas como materiales cementicios suplementarios para reducir el porcentaje de clínquer en el desarrollo de cementos, se enuncia el siguiente **problema científico de la investigación**

¿Cuál es la temperatura de calcinación más adecuada para las arcillas del yacimiento Neptuno, en Artemisa que les permita ser utilizadas como material cementicio suplementario en la producción adición mineral activa a base de arcilla calcinada, caliza y yeso (LC²)?

Hipótesis: Al usar la mejor temperatura de calcinación para las arcillas del yacimiento Neptuno en Artemisa, se obtendrán los mejores resultados de reactividad puzolánica del LC².

Objeto de estudio: Arcillas del yacimiento Neptuno en Artemisa.

Campo de acción: Propiedades puzolánicas de los productos de la calcinación del material arcilloso del yacimiento de Neptuno, Artemisa.

Objetivo General: Determinar la mejor temperatura de calcinación para el empleo de las arcillas del yacimiento Neptuno, Artemisa en la producción de LC².

Objetivos Específicos

1. Analizar la caracterización química de las arcillas procedentes del yacimiento Neptuno en Artemisa.
2. Determinar la influencia de la temperatura de calcinación en la reactividad puzolánica de los diferentes compósito del depósito arcilloso Neptuno, Artemisa según el Protocolo R³ y la NC TS 527:2013 “Cemento hidráulico – Métodos de ensayo - Evaluación de las puzolanas”.
3. Determinar el comportamiento reológico de los productos de calcinación de los diferentes compósitos del yacimiento arcilloso Neptuno, Artemisa a partir del método del Minicono y de la NC-235: 2012 “Pastas de Cemento - Determinación de la Plasticidad y su variación en el tiempo por el Método del Minicono”
4. Recomendar la temperatura de calcinación con la que se obtienen mejores resultados en la reactividad puzolánica y en la reología de los productos de los diferentes compósitos del yacimiento arcilloso Neptuno, Artemisa.

Tareas de la Investigación

- ❖ Búsqueda y análisis de la literatura científica relacionada con el empleo de arcillas calcinadas en la elaboración de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer (LC² y LC³).
- ❖ Caracterización de los materiales arcillosos.
- ❖ Activación térmica de las arcillas a 750°C, 800°C y 850°C.
- ❖ Molienda del material en la Geominera del Centro, en la provincia de Villa Clara.
- ❖ Caracterización de la finura por tamizado del mismo.
- ❖ Evaluación del potencial reactivo de materiales arcillosos del yacimiento Neptuno, Artemisa a partir de su composición geológica, química y mineralógica.
- ❖ Evaluación de la reactividad puzolánica de los productos obtenidos en pastas de acuerdo al Protocolo R³.
- ❖ Valoración de las perspectivas de utilización de las arcillas del yacimiento Neptuno, Artemisa como fuente de materiales cementicios suplementarios en la producción de aglomerantes de base clínquer – caliza – arcilla calcinada– yeso.

- ❖ Recomendar temperatura de calcinación.

Novedad científica: Con la presente investigación se pretende demostrar que las arcillas calcinadas pueden ser utilizadas para la producción de LC² con el fin de disminuir los grandes volúmenes de clínquer en la producción de cemento.

Aporte científico-técnico

- ❖ Determinación de la influencia de la temperatura de calcinación de las arcillas del depósito de Neptuno, Artemisa para materiales puzolánicos de alta reactividad para ser utilizados en la producción de LC².

Aporte medio-ambiental

- ❖ Con la utilización de arcillas como materiales cementicios suplementarios se reduce las cantidades de clínquer a utilizar en la producción de cemento Portland por lo tanto disminuyen las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Estructura del trabajo

Capítulo I: “Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario”.

Revisión bibliográfica que permite establecer consideraciones teóricas en el empleo de los materiales puzolánicos y la necesidad de búsqueda de nuevas fuentes de estos materiales; así como las principales características de las arcillas y su relación con los procesos de activación térmica en Cuba.

Capítulo II: “Características de los materiales y descripción de los métodos”.

Se detallan los materiales y métodos de ensayos que formaron parte de la investigación con el objetivo de evaluar las propiedades de las arcillas estudiadas como material cementicio suplementario a partir de diferentes muestras calcinadas a tres temperaturas (750°C, 800°C, 850°C).

Capítulo III: “Análisis y discusión de los resultados”.

Se expondrán todos los resultados obtenidos de los ensayos realizados y su interpretación.

Conclusiones, Recomendaciones y Anexos.

CAPÍTULO I. “Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario”

1.1 Producción de cemento Portland. Situación actual

El CPO se ha convertido en el material de construcción más usado a nivel mundial, después del agua, y se prevé que permanezca así durante los próximos 50 años (Aitcin, 2000). Gracias al empleo de este material en obras de Ingeniería Civil, su costo relativamente bajo, la posibilidad de su producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones, se ha transformado en el aglomerante de mayor utilidad a escala global.

El cemento Portland se produce calcinando una mezcla de piedra caliza y arcilla u otros materiales de composición similar y suficiente reactividad, a una temperatura de aproximadamente 1450 °C. Durante el proceso ocurren determinadas reacciones químicas, se produce la fusión parcial de los productos formados y se forman los nódulos de clínquer. El clínquer es mezclado con sulfato de calcio y finamente molido para hacer el cemento. El sulfato de calcio controla la velocidad de fraguado e influye en la resistencia mecánica. Es comúnmente adicionado como yeso, pero esta puede ser en parte o totalmente reemplazado por otras formas de sulfato de calcio. Algunas especificaciones permiten la adición de otros materiales en la etapa de molienda. El clínquer normalmente contiene cuatro fases principales, alita, belita, aluminato y ferrita. En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂, ya que más del 50% del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer. El reemplazo de una porción de clínquer con MCS está reconocida como la manera más efectiva de reducir las emisiones de CO₂ y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento, al mismo tiempo que puede mejorarse o mantenerse la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón (Massazza, 1993).

1.1.1 Producción de cemento Portland en Cuba (Betancourt, 2012).

Cuba fue el primer país que produjo cemento en América Latina (1895). En 1958 se alcanza un récord de producción de 4,27 millones de toneladas. En 1960 el gobierno cubano nacionalizó todas las fábricas de cemento y pasaron a control estatal. La inversión del gobierno cubano en las plantas de cemento permite incrementar el procesamiento de roca desde 2,5 millones de metros cúbicos en 1960 a 47,6 millones en 1980. El corte de los subsidios soviéticos al precio del petróleo suministrado a Cuba conduce a la reducción drástica de la producción.

En el período 1997 – 2011 se produjeron como promedio 1 600 mil toneladas al año de cemento. De ello se exportó un promedio de 921,6 miles de toneladas al año correspondiendo a un 53,3% de la producción nacional de acuerdo a las estadísticas.

Se hace siempre necesario mencionar que durante los años 90 los resultados productivos decrecieron y se restablecieron en el año 2000, de manera tal que en el 2011 estaba exportando cemento.

En la actualidad existen seis fábricas de cemento en la Isla (Figura1.1), produciendo aproximadamente un millón 500 mil toneladas

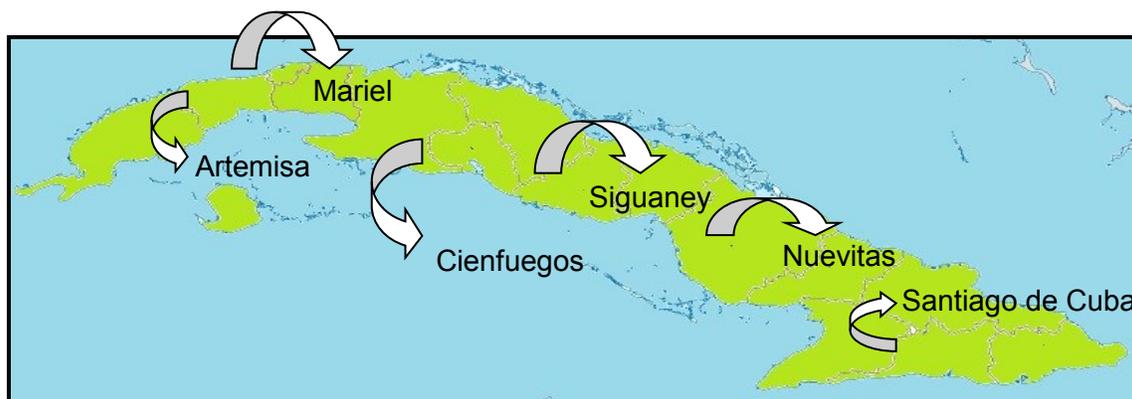


Figura 1.1. Distribución de las fábricas de cemento en Cuba.

Fábricas de cemento existentes en Cuba

1. Cementos Cienfuegos S.A. es una sociedad mixta. La fábrica fue inaugurada en 1980 con el nombre de Carlos Marx. Cuenta con tecnología alemana. Tiene una

capacidad para producir 1,5 millones de toneladas de clínquer y cemento al año.

Tipo de proceso: Vía seca

2. Fábrica de cemento del Mariel, en la Habana. Inaugurada con el nombre de René Arcay. Inaugurada en 1918. Desde 1973 hasta 1981 se modernizó con equipamiento español. Hasta el año 2001 la fábrica operaba sin filtrar los gases de escape, y expulsaba a la atmósfera entre 60 y 70 toneladas diarias de cemento. Tipo de proceso: Vía seca
3. Fábrica de cemento Siguaney (Provincia de Sancti Spíritus). Inaugurada en 1971. Tipo de proceso: Vía húmeda.
4. Nuevitas (26 de Julio), Camagüey. Inaugurada en 1968. Tipo de proceso: Vía húmeda.
5. Mártires de Artemisa. Inaugurada en 1921. Tipo de proceso: Vía húmeda.
6. Santiago de Cuba (José Merceron). Construida en 1955. Tipo de proceso: Vía húmeda.

1.2 Impacto ambiental

1.2.1 Aire

Las materias primas del cemento se suelen secar al mismo tiempo de su preparación y molienda, por lo que la humedad presente se desprende en forma de vapor de agua inocuo. Durante la cocción de las materias primas, u obtención del cemento, tiene lugar, por desprendimiento del dióxido de carbono (CO₂) contenido en la piedra caliza, la transformación de carbonato cálcico en óxido cálcico. Así pues, las emisiones gaseosas de la cocción están formadas por el CO₂ de la descarbonatación, los gases de escape de los combustibles y también vapor de agua en pequeña cantidad. Las emisiones de vapor de agua y de CO₂ son inherentes al proceso, mientras que la aparición de compuestos de azufre puede reducirse drásticamente con el uso de materias primas y combustibles adecuados y el control del proceso de combustión. Hasta ciertos límites los componentes sulfurados son fijados por la clinca del cemento durante la cocción.

En la industria del cemento se utilizan a menudo, como materiales combustibles complementarios, aceites, disolventes, residuos de pintura, neumáticos viejos u otros residuos combustibles que suelen contener contaminantes.

1.2.2 Polvo

Durante la obtención y elaboración de cemento, el proceso produce polvo en diferentes fases de trabajo.

La mayor parte del polvo separado se reconduce al proceso, siempre y cuando no se esperen acumulaciones de componentes de metales pesados, como talio, en el gas de escape. Sólo bajo condiciones desfavorables de materia prima y de combustible puede ser necesario separar y desechar parte del polvo, a causa de una alta concentración de componentes perjudiciales en el producto, como los cloruros alcalinos.

1.2.3 Ruido

Las fábricas de cemento ocasionan un impacto sonoro muy elevado. En la extracción de materias primas pueden producirse durante corto tiempo molestias de ruido a causa de explosiones y las consiguientes sacudidas.

Durante la preparación surgen ruidos molestos producidos, por ejemplo, por quebrantadoras de impacto y molinos para el desmenuzamiento de materiales duros. Estas instalaciones de trituración y las de preparación asociada se pueden encapsular para que el medio ambiente quede protegido de impactos sonoros graves. La mayor parte de molinos de materias primas y de cemento producen un ruido tan intenso que han de instalarse en locales insonorizados separados, donde no haya puestos de trabajo permanentes.

1.2.4 Agua

En el sector minero de la industria de cemento, el agua residual puede contener materias sedimentables.

Las fábricas de cemento son a veces grandes consumidores de agua, pero el proceso tecnológico no produce contaminación del agua. La mayor parte de esta agua se encuentra en circulación, por lo que sólo hay que reponer las pérdidas. En las instalaciones que trabajan con el método seco también se consume agua para la refrigeración de los gases de escape de los hornos. En las instalaciones que trabajan con el método húmedo se necesita agua para la molienda del lodo. Esta agua se desprende de nuevo por evaporación.

Se puede conseguir una reducción del consumo de agua aumentando la proporción de agua en circulación o manteniendo las pérdidas de agua al mínimo posible.

1.2.5 Suelo

En las inmediaciones de las fábricas de cemento, si el mantenimiento de las instalaciones de separación de polvo es insuficiente, los suelos pueden deteriorarse por el polvo que reciben.

Cierto es que en la fabricación del cemento se pueden introducir en el proceso elementos traza con efectos potencialmente negativos sobre el medio ambiente, a través de componentes de materia prima especiales, como mineral de hierro, o actualmente también a través de materiales de desecho combustibles, cada vez más utilizados.

1.2.6 Ecosistemas

Las fábricas de cemento necesitan materias primas que se encuentran a flor de tierra, por lo que al extraerlas no se pueden evitar interferencias en el paisaje circundante.

En la elección del emplazamiento de las fábricas de cemento, deben tenerse en cuenta también los aspectos ambientales. Si se trata de emplazamientos en zonas aprovechadas hasta entonces para la agricultura, han de considerarse posibles fuentes de ingresos alternativas, sobre todo para las mujeres afectadas. Para el posterior recultivo de una cantera se recomienda hacer la provisión de fondos ya durante la explotación.

1.3 Fabricación de CPO (Betancourt, 2012).

1. El proceso de producción del cemento Portland (Figura 1.2) comprende cuatro etapas fundamentales
2. Extracción, preparación y molienda de las materias primas
3. Dosificación y homogeneizado de la mezcla cruda
4. Cocción (obtención del clínquer)
5. Molienda del clínquer (Obtención de cemento)

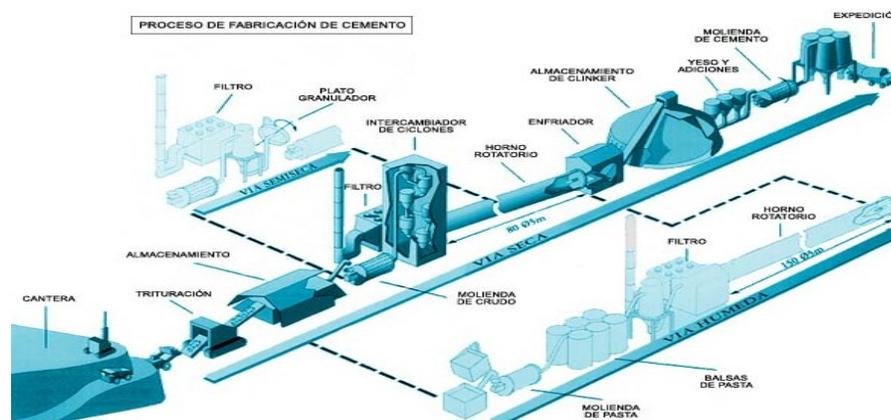


Figura 1.2. Proceso de fabricación del cemento Portland (Betancourt, 2012).

Para la fabricación del cemento Portland es necesario, primeramente, extraer la materia prima (caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso) de las canteras o minas a través de barrenación y detonación con explosivos, dependiendo de la dureza y ubicación del material, cuyo impacto es mínimo gracias a la moderna tecnología empleada. Una vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo.

Luego se realiza una segunda etapa, la de homogeneización, la cual se puede realizar por vía húmeda o por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales. En el proceso húmedo la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el clínquer a temperaturas superiores a los 1500°C. En el proceso seco, la materia prima es homogeneizada en patios de materia prima con el uso de maquinarias especiales. En este proceso el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el clínquer requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas.

El clínquer obtenido, independientemente del proceso utilizado en la etapa de homogeneización, es luego molido con pequeñas cantidades de yeso en equipos mecánicos que someten dicha mezcla a impactos metálicos o fuerzas de compresión elevadas, ya sea por prensas de rodillos, molinos verticales de rodillos, molinos de bolas o molinos horizontales de rodillos, obteniéndose finalmente el cemento.

Posteriormente se realiza el almacenamiento del producto. El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será envasado en sacos de papel, o surtido directamente a granel. En ambos casos se puede despachar en camiones, tolvas de ferrocarril o barcos.

Si es cemento en sacos, deberá almacenarse sobre parrillas de madera o piso de tablas; no se apilará en hileras superpuestas de más de 14 sacos de altura para almacenamiento de 30 días, ni de más de 7 sacos de altura para almacenamientos hasta de 2 meses. Para evitar que el cemento envejezca indebidamente, después de llegar al área de las obras, el contratista deberá utilizarlo en la misma secuencia cronológica de su llegada. No se utilizará bolsa alguna de cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento en el área de las obras, salvo que nuevos ensayos demuestren que está en condiciones satisfactorias.

Finalmente se despacha el cemento para su comercialización y uso.

La elaboración de clínquer en la producción de cemento, es la encargada de consumir grandes porcentos de energía y a su vez la que transmite mayores emisiones de CO₂ a la atmósfera, por lo que se ha tomado como alternativa viable el uso de los materiales puzolánicos, con el fin de disminuir los volúmenes de clínquer en la producción de cemento.

1.4 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)

1.4.1 Definición y clasificación de los MCS

Los MCS se definen como aquellos compuestos que se agregan al cemento e influyen en sus propiedades químico-físicas. Estos materiales se pueden clasificar en materiales con actividad hidráulica o materiales con actividad puzolánica. Los materiales hidráulicos son aquellos que reaccionan directamente con el agua formando hidratos con propiedades cementantes (Siverio, 2016). La American Standard and Testing Materials (ASTM) define como materiales puzolánicos a aquellos materiales silíceos o aluminio-silíceos que por sí mismos posee poca o ninguna propiedad cementante, pero finamente divididos y en presencia de agua, reaccionan

químicamente con el hidróxido de calcio y forma compuestos de propiedades cementantes.

Las propiedades de las mezclas fabricadas, dependerán del tipo de puzolana empleada, pero de manera general, incrementan la resistencia a edades avanzadas y la impermeabilidad del producto final, aunque también tienden a incrementar la demanda de agua (ACI, 2001).

1.4.2 Las puzolanas, clasificación, factores positivos y negativos

Las puzolanas reaccionan con los productos del cemento Portland, formando el cemento puzolánico, ofreciendo una mayor durabilidad del cemento, una mejora en la resistencia frente al agua de mar, el aumento en la resistencia a la tracción, la disminución del calor de hidratación y una mejor defensa ante los cloruros y sulfatos.

Las puzolanas se dividen en dos grupos fundamentales según su origen (Vázquez, 2016).

Puzolanas naturales

- Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, las tobas, la escoria y obsidiana.
- Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de los cuales son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Según (Siverio, 2016) las puzolanas se clasifican en dos tipos fundamentales:

Puzolanas artificiales

- Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo, residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800°C.

- Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.
- Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

Factores positivos

- Aumento de su estabilidad química y por tanto aporta una mayor durabilidad al cemento y el hormigón.
- Disminuye la liberación del calor de hidratación confiriendo menor permeabilidad en los hormigones, que los hace idóneos para la construcción de presas y obras que necesiten grandes masas de este material.
- Minimiza la expansión volumétrica durante el fraguado; lo que elimina o
- reduce las grietas y con ello aumenta la resistencia mecánica de la estructura a las cargas.
- Mejora la manejabilidad de la mezcla de hormigón, con menor tendencia a la segregación de sus componentes.
- Menor costo de producción (ahorro de combustible al disminuir el consumo de clínquer).
- Permite la fabricación de hormigones de baja densidad.
- Reduce la presencia de cal libre, porque proporciona los elementos necesarios para completar la reacción química de formación de las fases cristalinas principales que acompañan al cemento. La cal libre presente en el clínquer afecta la resistencia química del cemento y del hormigón, exponiéndolo al “lavado químico” que produce la lluvia y la humedad atmosférica.
- Puede ser usada como aislante térmico.

Factores negativos

- Necesidad de una mayor cantidad de agua de mezclado para una consistencia dada.
- Menores resistencia a la compresión en edades cortas, pero mayores a partir de los 28 días de fraguado.
- En ocasiones provoca una mayor retracción al secado.

1.4.3 Empleo a nivel mundial de los MCS

Actualmente existen varias fuentes de MCS, destacándose los desechos de procesos industriales; entre ellos podemos mencionar las cenizas volantes pulverizadas, las escorias granuladas de alto horno, y el humo de sílice. Otra alternativa la constituye el empleo de puzolanas naturales y artificiales, entre las cuales destacan las cenizas volcánicas, tobas caolinizadas, arcillas calcinadas y residuos agrícolas como la cáscara de arroz. Otro de los materiales usados por la industria del cemento, a nivel mundial, es el carbonato de calcio en forma de piedra caliza sin calcinar, el cual tiene una reactividad muy baja en los cementos convencionales, por lo que se añade habitualmente en pequeñas proporciones como material inerte (Vizcaíno, 2014). La tabla 1.1 resume las características más relevantes de los MCS antes mencionados.

Tabla 1.1. Características de los MCS más empleados en la Industria del cemento (Vizcaíno, 2014)

<u>MCS</u>	<u>Origen</u>	<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>	<u>Disponibilidad</u>
Escorias de altos hornos	Residuo de la producción de hierro y acero	Alta resistencia a edades avanzada y mejora de la resistencia a ataque químico	Baja resistencia a edades tempranas y alta demanda de electricidad durante la molienda	Difícil de predecir, en 2006 se produjeron 200 MMt
	Residuo de la combustión del carbón mineral en plantas de	Mejora de la laborabilidad, reduce la exudación, menor	Baja resistencia a edades tempranas, disponibilidad	Difícil de predecir, en 2006 alcanzaron las

Cenizas volantes	energía eléctrica	calor de hidratación, alta resistencia a edades avanzadas y durabilidad (dependiendo de la exposición)	puede ser reducida debido a cambios de las fuentes de combustible en el sector energético	500 MMt
Humo de sílice	Subproducto de la producción de metal de silicio o aleaciones ferro silíceas en hornos de arco eléctrico	Alta resistencia a edades tempranas, efectiva en la reducción de la permeabilidad, por lo que asegura una buena protección del acero contra la corrosión	Incremento de la demanda de agua. Alta reactividad acelera el endurecimiento	Muy baja, producción estable, 0.9 MMt en 2006
Puzolanas naturales	Rocas sedimentarias y volcánicas	alta resistencia a edades avanzadas, laborabilidad variable, mejora de la resistencia al ataque químico	Baja resistencia a edades tempranas, las propiedades del cemento pueden variar	Variable, muy regional. En 2003 se estimaron 300 MMt (solo el 50 % usado)
Metacaolín	Calcinación de arcillas caoliníticas puras	Alta resistencia a edades tempranas y avanzadas, mejora de la resistencia al ataque químico	Alta demanda de agua	Reservas estimadas de caolín superiores a las 1000 MMt
Piedra caliza	Depósitos naturales de rocas sedimentarias	Mejora de la laborabilidad y la exudación. Aumenta la resistencia a edades tempranas	Baja resistencia a ambientes de sulfatos	Fácilmente disponible, ocupa aproximadamente el 10 % de la superficie terrestre

1.4.4 Evolución histórica del empleo de MCS en Cuba

En Cuba existen más de 25 yacimientos y manifestaciones de zeolitas naturales, distribuidas a todo lo largo y ancho del país. De acuerdo con datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales del Ministerio de la Industria Básica, estos yacimientos se encuentran distribuidos prácticamente en todo el territorio nacional: Pinar del Río, La Habana, Villa Clara, Cienfuegos, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y en Guantánamo. Se han estudiado a profundidad 16 yacimientos que totalizan unos 20,9 millones de toneladas de recursos medidos, 69,95 millones de toneladas en recursos indicados y 214,61 millones de toneladas en recursos inferidos (Rebelde, 2016).

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 (Martirena, 2003). Los trabajos e investigaciones realizadas bajo la autoría de (Fernández, 2009, Alujas, 2010a, Castillo, 2010) 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.

Más reciente se ha reportado la activación térmica de arcillas multicomponentes y la producción de un aglomerante con solo 50 % de clínquer mezclado con 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza molida que mostró un comportamiento similar el cemento PP-35 y a menor costo que este (Vizcaíno, 2014). Es por ello que, el estudio de nuevas fuentes de materiales arcillosos con bajos contenidos de caolinita, resulta una importante alternativa para disminuir los costos del cemento y suplir la demanda del mismo, así como, mitigar las emisiones CO₂ de su producción, y en la medida de lo posible aprovechar las tecnologías existentes sin grandes inversiones. El objetivo fundamental de continuar desarrollando estos estudios, se basa en adquirir un mayor grado de conocimiento de las reservas que existen en todo el país, vinculando el uso de estos materiales arcillosos como materiales cementicios suplementarios para la producción de cemento (Siverio, 2016).

1.5 Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario (MCS)

1.5.1 Características generales, composición química, estructura y clasificación

Actualmente son bien conocidas las ventajas económicas y medioambientales de la sustitución del clínquer de cemento por otros materiales cementicios suplementarios. Las arcillas calcinadas representan una atractiva alternativa como fuente de puzolanas, gracias a su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas.

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. 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 (Brow, 1961).

Bajo el término arcillas se engloba un vasto grupo de minerales cuyos elementos predominantes son el Si, el Al y el O, y cuyas propiedades fisicoquímicas derivan de su composición química, de su particular estructura interna en forma de capas (filosilicatos) y de su tamaño de grano muy fino (Brow, 1961).

Los minerales de la arcilla son filosilicatos de aluminio hidratados a veces con cantidades variables de hierro, magnesio, metales alcalinos, tierras alcalinas y otros cationes. Los minerales de la arcilla son en general microscópicos. En la naturaleza los minerales de la arcilla son importantes componentes de la lutita y de los suelos. Se originan a partir de la meteorización o alteración hidrotermal de feldespatos, piroxenos y micas.

Tomando en cuenta las fases minerales presentes en las materias primas arcillosas estas se pueden clasificar en los grupos siguientes (Brigatti, 2006).

1. Grupo de la caolinita: incluye los minerales caolinita, dickita, haloisita y nacrita.
2. Grupo de la esmectita: incluye pirofilita, talco, vermiculita, sauconita, saponita, nontronita, montmorillonita.
3. Grupo de la illita: incluye a las micas arcillosas. La illita es el único mineral.
4. Grupo de la clorita: incluye una amplia variedad de minerales similares con considerable variación química.

1.5.2 Activación térmica de las arcillas

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 absorción 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, 2010b).

Para la producción de cemento debe tenerse en cuenta la activación de las arcillas al ser utilizadas como materiales puzolánicos con el fin de aumentar su reactividad y rendimiento, de forma tal que se cumplan las normativas vigentes de resistencia a edades tempranas, demanda de agua y durabilidad para la producción de cemento.

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 and Day, 2001).

Al realizar la calcinación de las arcillas se pueden distinguir varias etapas. A partir del calentamiento desde la temperatura ambiente hasta los 250°C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 850 °C ocurre la remoción de los OH- estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden

parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Heller-Kallai, 2006).

Se ha observado que, independientemente del tipo de mineral arcilloso, alrededor de los 950°C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la arcilla (He et al., 1995). Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, fenómenos que delimitan, desde el punto de vista estructural, el intervalo dentro del cual una fase arcillosa puede ser convertida en un material puzolánico mediante activación térmica (Mendez et al., 2003).

1.5.3 Reacción puzolánica

Las reacciones puzolánicas ocurren bajo las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido al igual que en el proceso de hidratación del cemento. La reacción puzolánica es lenta en comparación con la reacción de hidratación del cemento, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos. Diversos factores pueden modificar la actividad puzolánica de un material, estos factores pueden ser de tipo interno o externo (Costoya, 2008). Dentro de los factores internos que más influyen en la actividad puzolánica se encuentran la composición química y mineralógica, finura, morfología interna y grado de desorden estructural. Como factores externos se encuentran la humedad, la temperatura, así como la presencia de aditivos (Castillo, 2010).

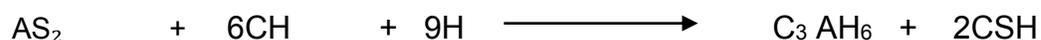
La composición de los CSH formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los CSH formados durante la reacción de hidratación del cemento, pero con una relación Ca/Si generalmente más baja. Si existen apreciables cantidades de alúmina reactiva en la puzolana, tal y como es el caso de las arcillas 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

(Fernández, 2009), (Taylor, 1990). 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, 2001).

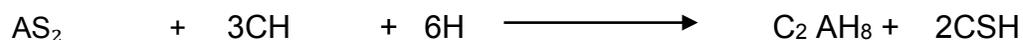
Para el caso particular de las arcillas calcinadas, tres reacciones químicas pueden ser planteadas de forma hipotética para describir la interacción entre el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la sílice y la alúmina que se encuentran en un estado de alto desorden estructural. En este caso, las reacciones son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



(Metacaolín) + (Portlandita) + (Agua) = (Tetracalcioaluminato Hidratado) + (silicato de calcio Hidratado)



(Metacaolín) + (Portlandita) + (Agua) = (Tetracalcioaluminato Hidratado) + (silicato de calcio Hidratado)



(Metacaolín) + (Portlandita) + (Agua) = (Stratlingita o Gehhelenita) + (silicato de calcio Hidratado)

1.5.4 Evaluación de la reactividad puzolánica

La actividad puzolánica se define como la capacidad de una puzolana de reaccionar con la cal y generar resistencias.

Existen diversos métodos para evaluar la reactividad puzolánica, casi todos basados en la medición durante un intervalo de tiempo más o menos largo de distintas propiedades

físicas o químicas directamente relacionadas con la reacción puzolánica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o Ca(OH)-Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones (Alujas, 2010b).

A través de los ensayos de resistencia mecánica se obtienen 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 no ofrecen la información necesaria 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 el propósito de complementar este método, modernas técnicas de caracterización han ido ganando creciente importancia en el estudio de la reacción puzolánica (Alujas, 2010b).

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

Actualmente, un conjunto de 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, han desarrollado la aplicación de un nuevo protocolo experimental, que tiene como

propósito evaluar la actividad puzolánica de arcillas calcinadas, denominado Protocolo R3 (Rapid, Relevant and Reliable) (Avet, 2015), que evalúa la reactividad puzolánica en sistemas hidróxido de calcio - arcilla calcinada - caliza. Este ensayo que ha sido aprobado a escala de laboratorio para varias arcillas calcinadas, se basa fundamentalmente en medir el calor total liberado por una pasta cal – puzolana, a la cual se le adicionan álcalis y sulfatos, de forma que se simulan las condiciones existentes en un sistema mezclado cemento – puzolana. Durante un período de tiempo determinado, el calor que llega a ser liberado, 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.

1.5.5 Las arcillas caoliníticas de bajo grado como fuente de MCS

La mayoría de las investigaciones acerca del uso de arcillas calcinadas como materiales puzolánicos parten del estudio de rocas arcillosas con un alto grado de pureza, donde existe el claro predominio de una fase arcillosa, que determina el desarrollo del carácter puzolánico por activación térmica. El mayor volumen de investigaciones reportadas hasta el momento se centra en los minerales arcillosos de la familia de las caolinitas. Estos 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 et al., 1992).

Dentro de las arcillas calcinadas, el metacaolín (MK) 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. Estos hidratos suplementarios se forman con bajas relaciones Ca/Si en el rango de 0,8 a 1,5 permitiendo atrapar iones alcalinos de la solución de poros. Esta reducción en la alcalinidad (y el pH asociado) en la solución de poros, así como la reducción de la portlandita son considerados como los efectos más beneficiosos de las puzolanas al reducir la expansión debido a la reacción sílice-álcali (Ramlochan et al., 2001).

1.5.6 Arcillas caoliníticas en Cuba. Potencialidades de utilización

En nuestro país no se han efectuado suficientes investigaciones sobre las potencialidades de utilización de las arcillas como fuente de puzolanas. Actualmente, en trabajos desarrollados como parte de proyectos del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Martha Abreu de Las Villas” se han demostrado las potencialidades de activación térmica de arcillas cubanas de bajo grado para la obtención de un material puzolánico de alta reactividad y con ella producir materiales puzolánicos con altas potencialidades de empleo como MCS (Alujas, 2010b), (Vizcaíno, 2014).

Es conocido a nivel mundial el uso del metacaolín como material cementicio suplementario. El inconveniente del uso de metacaolín se centra en la necesidad de arcillas puras en mineral caolín para su producción. Formas viables de disminuir estas desventajas sería el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza.

En Cuba se han desarrollado varios estudios y trabajos como parte de proyectos del Centro de Investigación y Desarrollo de estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Martha Abreu de Las Villas” en la autoría de (Alujas, 2010b), (Castillo, 2010), (F. Martirena, 2011) con el propósito de demostrar las potencialidades de activación térmica de arcillas cubanas de bajo grado para obtener un material puzolánico con un comportamiento similar al producto industrial conocido como metacaolín, que es producido con caolines de alta pureza.

En nuestro país se encuentran reportados cerca de 45 depósitos donde hay presencia de arcillas caoliníticas con reservas inferidas en alrededor de treinta millones de toneladas, distribuidas generalmente en la región occidental y central. De este

volumen, cerca de catorce millones se encuentran concesionados para su explotación a diferentes industrias (Mendez et al., 2003).

En la actualidad, se realizan diversas investigaciones para continuar profundizando las aplicaciones de las arcillas calcinadas en la producción del cemento cubano, como puzolanas de alta reactividad.

1.6 Características específicas del LC³

En el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) se han venido realizando varios estudios sobre el LC³. Este es una nueva alternativa que reduce, en gran medida, el consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y hace más eficiente y viable la producción del cemento. Este nuevo conglomerante es un cemento ternario, y en su producción se reduce considerablemente las emisiones de CO₂ hasta un 50% y al mismo tiempo muestra propiedades similares al cemento Portland. Además, tiene como ventaja fundamental, elevar el nivel de sustitución de clínquer sin comprometer las propiedades finales del cemento.

El LC³ formulado a escala de laboratorio con la adición combinada arcilla calcinada – caliza en sustitución de los contenidos de clínquer hasta un 60 % alcanzan resistencias mecánicas superiores a los 35 MPa a los 28 días. En ello influye la alta finura propiciada por la naturaleza de la adición y la alta reactividad del sistema.

1.7 Particularidades fundamentales del LC²

Con el propósito de sustituir gran porcentaje de cemento en las mezclas de hormigones y morteros, se ha venido realizando el estudio de una nueva adición mineral, LC², que no es más que la combinación de arcilla calcinada + caliza + yeso, presentándose este último en pequeñas cantidades, con el fin de disminuir los aluminatos, con una distribución 70-30% (70% de cemento y 30% de arcilla calcinada). Esta adición es una estrategia para burlar las normas de los MCS.

1.8 Conclusiones parciales del capítulo

- Los minerales arcillosos que son activados térmicamente, constituyen una excelente alternativa para la sustitución de grandes porcentajes de CPO al ser

utilizados como fuente de materiales cementicios suplementarios debido a su amplia disponibilidad y a sus particulares características químicas y estructurales.

- Al utilizar los MCS en la sustitución de los porcentajes de clínquer en la producción de cemento se obtiene buenos resultados en cuanto a resistencia y se logra un cemento con el que se puede construir hormigones y morteros 12 veces más resistente a la penetración de cloruros que los fabricados con cementos ordinarios. Al mismo tiempo, se reduce en el costo de producción.
- En Cuba es necesario continuar los estudios en los yacimientos de arcillas caoliníficas cercanos a las fábricas de cemento que permitan el suministro de arcillas para la producción de LC³ y LC².

CAPÍTULO II. “Características de los materiales y descripción de los métodos”

2.1 Generalidades del yacimiento

El yacimiento objeto de estudio se ubica en la localidad de Neptuno, en la provincia Artemisa y se escoge por la cercanía a la fábrica de cemento Mártires de Artemisa y por los resultados que ofrecieron estudios previos, los cuales muestran el alto contenido de caolín que presenta la arcilla de dicho yacimiento entre otras propiedades que le permite ser utilizada como material puzolánico una vez activada térmicamente. Se seleccionaron cinco puntos para ser explotados.

2.1.1 Extracción de la arcilla. Muestreo

Para la realización del muestreo de las arcillas objeto de estudio primeramente se realiza una excavación con ayuda de una retroexcavadora en las zonas identificadas por el geólogo en la localidad de Neptuno, Artemisa de 4m de largo y hasta aproximadamente 3m de profundidad que es cuando comienza a aparecer el caolín manifestándose en betas de color gris claro a blanco. Luego se debe realizar un corte superficial perpendicular a la excavación en una de las paredes de la trinchera que queda conformada por la retroexcavadora. Posterior a esto se comienza a extraer la arcilla con ayuda de un hacha de arriba hasta abajo uniformemente para garantizar que la muestra sea representativa. En este momento el geólogo debe realizar la caracterización visual de la arcilla extraída según la información que ofrezca la misma. La profundidad del corte perpendicular estará en función de la cantidad necesaria a extraer en cada trinchera. En la investigación presente se identificaron cinco puntos con alto contenido de arcillas caoliníticas y se extrajeron aproximadamente 20 kg de cada uno.

Lo antes descrito se muestra a continuación en la figura 2.1 (a, b, c, d).

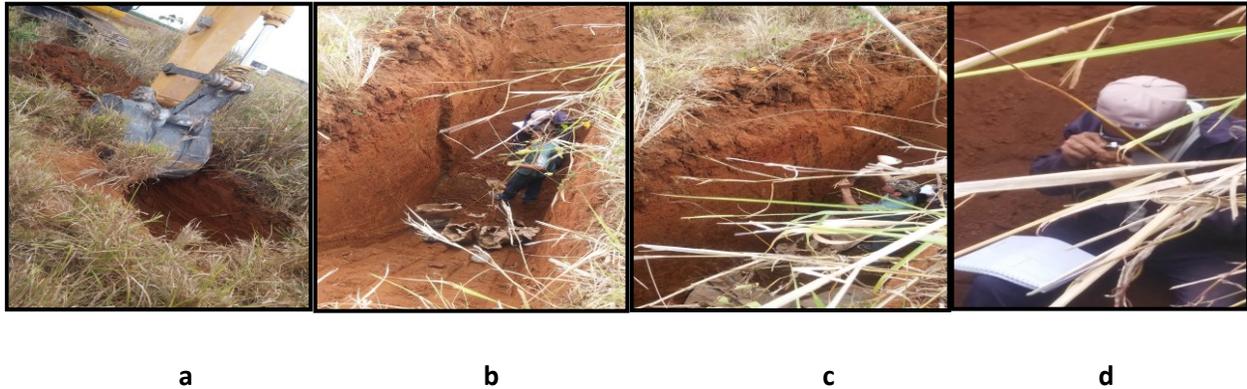


Figura 2.1. Muestreo. a. descortezado y excavación, b. corte transversal a la trinchera, c. extracción de la arcilla con el hacha, d. Inspección visual del geólogo.

2.2 Procesamiento de la materia prima

Una vez colectadas las muestras del yacimiento, las mismas fueron secadas a temperatura ambiente por 24 horas y luego se introdujeron en la estufa por 12 horas más, a una temperatura de 100°C, con el propósito de eliminar totalmente la humedad. Posteriormente fueron molidas en un molino de bolas, con el propósito de reducir las partículas de las muestras para la fácil calcinación del material. Finalmente se homogenizó el material en una hormigonera para formar los 2 compósitos a utilizar en la investigación, un primer compósito integrado por las arcillas de los puntos 1, 2, 3, 5 y un segundo compósito conformado con las arcillas de los puntos 1, 3, 4, 5.

2.2.1 Activación térmica y proceso de calcinación

El tratamiento térmico de las arcillas se realizó en una mufla de laboratorio alemana marca Nabertherm a través del siguiente proceso de calcinación:

- Primeramente, se tomaron muestras de aproximadamente 5 kg de cada compósito separados en varias bandejas.
- Se introdujo el material de ambos compósitos en la mufla de laboratorio separadas por crisoles de porcelana, con el propósito de diferenciar el compósito 1 del compósito 2.

- Se mantiene el material a 200°C durante 30 minutos con el propósito de eliminar la humedad del mismo.
- Posteriormente, la temperatura aumenta a 750°C, 800°C y 850°C; según el caso y se mantiene durante 2 horas.
- Se extrae la arcilla de la mufla en caliente y se esparce sobre una superficie metálica para que alcanzaran rápidamente la temperatura ambiente.
- Luego se pesa y se obtiene el peso final, ya que va a existir una diferencia de peso entre su estado natural y luego de ser calcinada, debido a la pérdida de humedad y de sustancias orgánicas después de la quema.

El proceso de calcinación de las arcillas se muestra en la figura 2.2 (a, b, c, d).

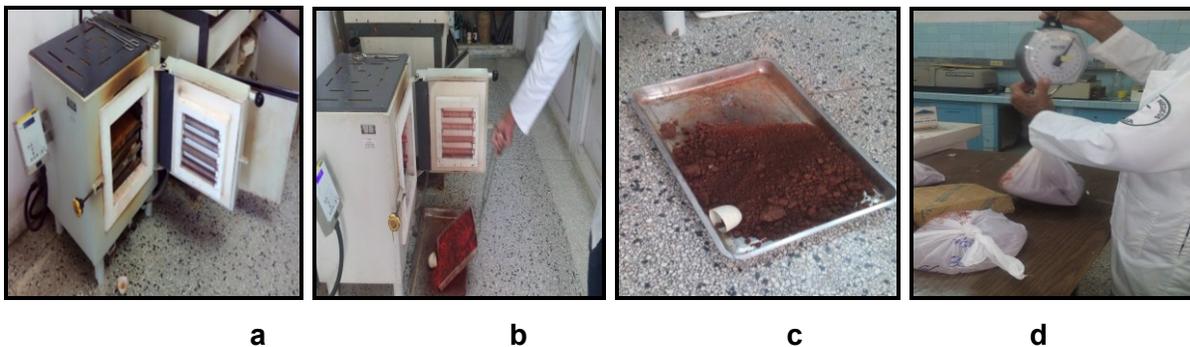


Figura 2.2. Proceso de calcinación de las arcillas. a. Mufla de laboratorio, b. extracción de la arcilla en caliente, c. enfriamiento del material luego de ser extraído de la mufla, d. pesaje del material después de la calcinación.

2.2.2 Molienda de la arcilla

Luego de calcinada las muestras fueron molidas en la Geominera del Centro, perteneciente a la provincia de Santa clara, en un molino planetario con bolas de ágata MB-600 hasta alcanzar una finura aproximada de un 10 % de retenido en el tamiz de 90 μm .

2.3 Procedencia de las materias primas utilizadas en la elaboración de las mezclas

Para la investigación se utilizaron como materias primas:

- Arcilla procedente del yacimiento Neptuno en Artemisa,
- Cemento Portland P-35 de la fábrica Karl Marx en la provincia Cienfuegos,

- Caliza procedente de Nieve Morejón, en Guayos, Sancti Spíritus (suministrada por la fábrica de cemento de Siguaney y procedente de la misma entidad),
- Yeso de Punta Alegre, fue tomado en forma de roca del almacenamiento en la fábrica,
- Arena normalizada, proveniente de la Isla de la Juventud,
- Aditivo Dynamon SX 32, adquirido por el país a través de importaciones (Italia),
- Agua potable.

2.4 Caracterización de los materiales empleados en la investigación

2.4.1 Arcilla

2.4.1.1 Caracterización química

La caracterización química de la arcilla perteneciente al yacimiento Neptuno, en Artemisa se realizó mediante la fluorescencia de Rayos X (FRX), obteniéndose diferentes porcentajes de sustancias químicas para el compósito 1 y para el compósito 2 que serán analizados en el capítulo siguiente.

2.4.1.2 Caracterización de la finura por tamizado

La finura de la arcilla se evalúa a través del tamiz de 90- μm y de 45- μm .

- Caracterización de la finura por el tamiz de 90- μm .

La Empresa Geominera del Centro perteneciente a la provincia de Villa Clara, hace entrega del material con un 10% de retenido en el tamiz de 90- μm .

- Caracterización de la finura por el tamiz de 45- μm . (Figura 2.3 a, b, c)

Se realizó el tamizado en el tamiz de 45- μm según las especificaciones de la norma ASTM C595 –2016 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, donde el porcentaje retenido en el tamiz de 45- μm no debe sobrepasar al 20 %; para ello se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento.

- Se pesa el tamiz de 45- μm , limpio y seco.

Se toman 30 g de la arcilla ya calcinada, como lo plantea la NC TS 528-2013 “Puzolanas Especificaciones”, para cada compósito a las diferentes temperaturas y se analizan por separado.

- Se coloca un fondo debajo del tamiz y se vierten 30 g del material en el tamiz de 45- μm .
- Luego se vierte agua sobre la muestra dentro del tamiz con un chorro suave de agua y se va lavando la misma hasta que el agua salga lo más clara posible.
- Posteriormente, se coloca el tamiz con el material húmedo que quedó retenido en él, en la estufa durante 24 horas.
- El agua que fue utilizada para humedecer la muestra, se deja en reposo en un recipiente por 24 horas, con el propósito de que el material se asiente, para luego ser recuperado.
- A las 24 horas, se extrae el material de la estufa y se pesa.
- Después se halla la diferencia de peso, entre el peso del tamiz con el material después de que se saca de la estufa, y el peso del tamiz.
- • Posteriormente, con este valor, se halla el porcentaje retenido en el tamiz de 45- μm , el cual, según la norma ASTM C595 -2016 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements”, no debe sobrepasar el 20% para que este material sea utilizado como puzolanas en la producción de cemento.
- Luego de haber pasado las 24 horas se extrae el agua que se dejó en reposo con una manguera y el material que quedó asentado, húmedo, se introduce en la estufa por 24 horas más y luego se recupera el mismo.



a

b

c

Figura 2.3. Caracterización de la finura a través del tamiz de 45- μm . a. Muestras de 30 g de arcilla, b. tamiz de 45- μm seco, c. pesaje del tamiz de 45- μm húmedo.

2.4.2 Cemento P-35

El cemento utilizado fue elaborado en la fábrica de cemento Karl Marx de la provincia de Cienfuegos, de acuerdo a la NC 54 205:80 clasificado como cemento Portland P-35 (Figura 2.4). En la tabla 2.1 y la tabla 2.2 se muestran las propiedades físico-mecánicas del cemento P-35 de Cienfuegos y la composición química del cemento P-35 de Cienfuegos, respectivamente.

Tabla 2.1. Propiedades físico-mecánicas del cemento P-35 de Cienfuegos.

Ensayo	Resultados
Tiempo de fraguado inicial (min)	105
Tiempo de fraguado final (h)	3,25
Finura (Retenido en el tamiz de 45-μm) (%)	23,2
Finura (Retenido en el tamiz de 90-μm) (%)	1,7
Superficie específica. (Blaine) (cm²/g)	3671
P.U. Suelto (kg/l)	1,11
Resistencia Comp. 3 días (MPa)	28,9
Resistencia Comp. 7 días (MPa)	35
Resistencia Comp. 28 días (MPa)	44,1

Fuente: Confeccionado en el laboratorio de la fábrica de cemento Carlos Marx

Tabla 2.2. Composición química del cemento P-35 de Cienfuegos.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CL	CN	SO ₃	PPI	R.I	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
21,73	5,02	3,12	60,66	1,24	24,1	3,05	2,02	2,20	1,51	0,41	0,59

Fuente: Confeccionado en el laboratorio de la fábrica de cemento Carlos Marx



Figura 2.4. Cemento P-35 de la fábrica Karl Marx de Cienfuegos

2.4.3 Caliza

La caliza empleada (Figura 2.5) posee como composición química la que se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química de la caliza

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃
Porcentaje %	4.12	1.15	0.64	51.59	1.21	40.92	92



Figura 2.5. Caliza de Nieve Morejón, en Guayos, Sancti Spíritus

2.4.4 Yeso

El yeso utilizado en la investigación (figura 2.6), presenta la siguiente caracterización química (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Composición química del Yeso

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PPI	RI
Por ciento %	5.24	4.7	3.38	30.36	1.96	31.95	21.67	9.07



Figura 2.6. Yeso de Punta Alegre

2.4.5 Arena normalizada

La arena normalizada que se utilizó, es adecuada, ya que cumple con las especificaciones de la NC 54-387:1997.

2.4.6 Aditivo Dynamon SX 32

Dynamon SX 32 (Figura 2.7) es un aditivo líquido superplastificante, a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehído. Aumenta la resistencia mecánica y reduce la relación agua/cemento, con pérdida de trabajabilidad notablemente reducida. Los datos técnicos de este aditivo se muestran en la tabla 2.5. (MAPEI, 2010).

Tabla 2.5. Datos técnicos del Dynamon SX-32. (Valores característicos)

Datos técnicos(valores característicos)	
Consistencia	Líquido
Color	Ámbar
Densidad según la ISO 758 (g/cm ³)	1,08 ± 0,02 a +20°C

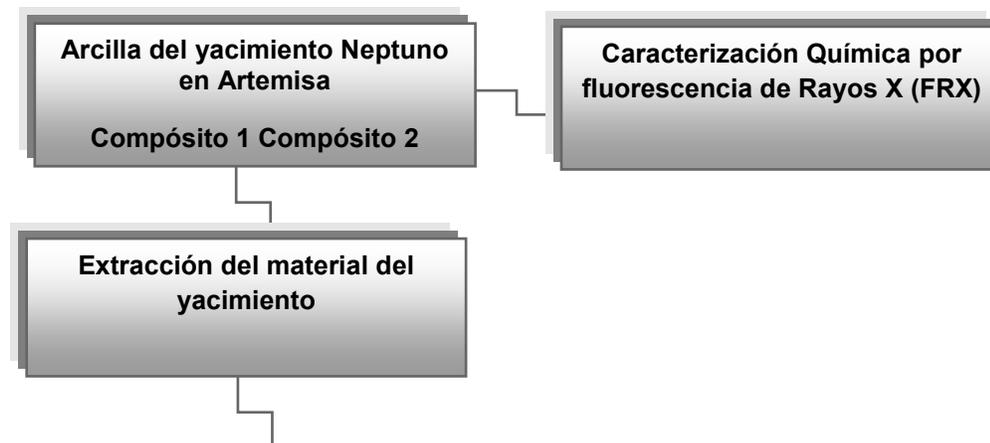
Residuo seco según EN 480-8 (%)	22,1 ± 1,1
Acción principal	aumento y conservación de la trabajabilidad y/o reducción de agua
Clasificación según EN 934-2	reductor de agua de alta eficacia / superfluidificante, prospecto 11,1;11,2
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%)	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de álcali (Na ₂ O) equivalente según EN 480-12 (%)	< 3,5
pH según la ISO 4316	6,5 ± 1
Conservación	12 meses en los envases originales no abiertos, proteger del hielo

2.4.7 Agua

El agua que se empleó es conforme, evaluada por la práctica como adecuada para la producción de pastas y morteros, cumpliendo con el apartado 7.7 de la NC 54-2000.

2.5 Diseño experimental de la investigación

En el diseño experimental de la investigación permitirá evaluar las potencialidades de la arcilla procedente de Neptuno, Artemisa una vez activada térmicamente y seleccionar la temperatura de calcinación idónea para utilizar dicha arcilla como material cementicio suplementario a través de ensayos reológicos y mecánicos (Figura 2.8).



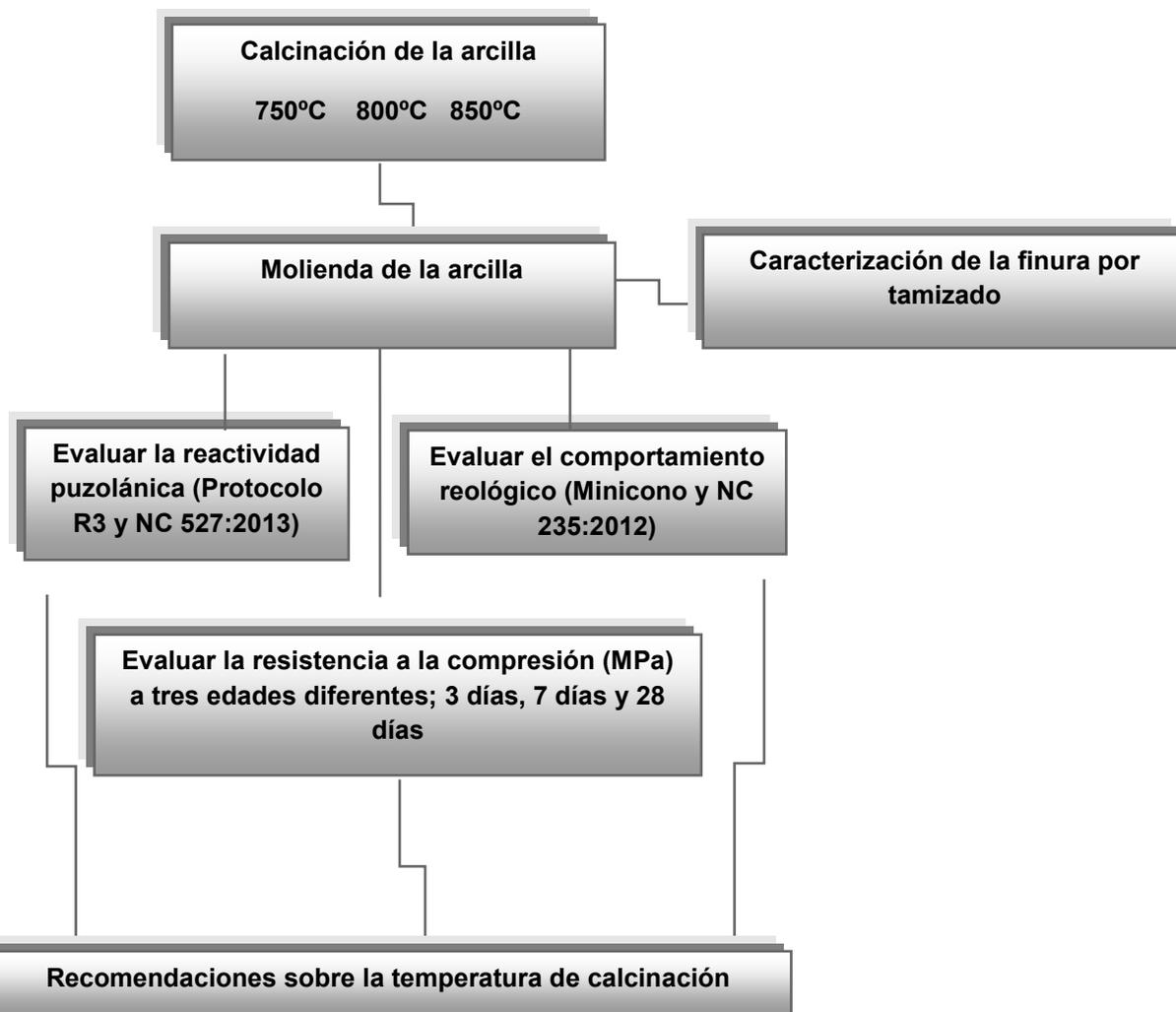


Figura 2.8. Esquema general de trabajo

- a) Primeramente, se realizó la extracción de la arcilla del yacimiento Neptuno, en Artemisa.
- b) Trasladar el material desde Artemisa hasta la Facultad de Construcciones de la Universidad Central, “Martha Abreu de las Villas”, en la provincia de Santa Clara.
- c) Caracterización química mediante la fluorescencia de Rayos X (FRX).
- d) Secado a temperatura ambiente por 24h y por 12h en la estufa.
- e) Moler las muestras de arcillas parcialmente y formar los 2 compósitos objeto de estudio.

- f) Calcinar la arcilla a tres temperaturas específicas (750°C, 800°C y a 850°C) en la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
- g) Molienda del material en la Geominera del Centro, en la provincia de Santa Clara.
- h) Caracterizar la finura por tamizado de la arcilla a través del tamiz de 45- μ m.
- i) Evaluar la reactividad puzolánica a partir del ensayo de Calorimetría Isotérmica (Protocolo R³).
- j) Evaluar el comportamiento reológico a través del método del Minicono.
- k) Evaluar la resistencia a la compresión a tres edades diferentes; a los 3 días, a los 7 días y a los 28 días.
- l) Dar recomendaciones sobre la temperatura de calcinación más adecuada.

2.5.1 Declaración de las variables y parámetros de estado

En el diseño experimental de la investigación, se declaran las variables y los parámetros de estados, los cuales se destacan a posteriormente en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Variables y parámetros del diseño experimental.

Variable dependiente	Variable independiente	Parámetro de estado
Temperatura idónea de calcinación	Arcilla del yacimiento Neptuno, en Artemisa Compósito 1	Cemento
Fluidez o plasticidad	Arcilla del yacimiento Neptuno, en Artemisa Compósito 2	Relación a/c de 0,5
Reactividad puzolánica		Áridos normalizados

2.6 Series de estudio

Las denotaciones de la serie de estudio producto de la calcinación se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Series de estudio de la investigación

Origen	Temperatura (°C)	Denotación
Patrón de cemento P-35	-	P-35
Compósito 1	750	C1 ₇₅₀
Compósito 1	800	C1 ₈₀₀
Compósito 1	850	C1 ₈₅₀
Compósito 2	750	C2 ₇₅₀
Compósito 2	800	C2 ₈₀₀
Compósito 2	850	C2 ₈₅₀

2.7 Tipo de análisis estadístico

El análisis estadístico se realiza a través de las medias de los resultados de los ensayos realizados a los 2 compósitos a las 3 temperaturas de calcinación evaluadas. En el caso del ensayo del Minicono se realizan 3 réplicas y se toma como referencia la media resultante de dichas muestras las cuales son comparadas con las medias de las réplicas de la muestra patrón permitiendo llegar a conclusiones determinantes. En el caso del ensayo de resistencia se procedió de similar, se realizaron 3 réplicas de probetas para las 3 temperaturas para cada compósito y se realizó el análisis con los valores medios de estas réplicas comparándolos con las medias de una muestra patrón.

Otro de los procedimientos estadísticos realizados fue la desviación estándar que permitió ofrecer el margen de error en la realización de los ensayos.

2.8 Descripción de los ensayos

2.8.1 Evaluación de la reactividad puzolánica mediante Calorimetría Isotérmica (Protocolo R3)

Para determinar la reactividad puzolánica de los productos de calcinación de las arcillas calcinadas a 750°C, 800°C y 850°C se utilizó un ensayo experimental denominado Protocolo R³, que ha sido desarrollado por un conjunto de 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. Este ensayo que ha sido aprobado a escala de laboratorio para varias arcillas calcinadas, se basa fundamentalmente en medir el calor total liberado por una pasta cal – puzolana, a la cual se le adicionan álcalis y sulfatos, de forma que se simulan las condiciones existentes en un sistema mezclado cemento – puzolana. Durante un período de tiempo determinado, el calor que llega a ser liberado, 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.

2.8.1.1 Utensilios, equipos y materiales

Utensilios y equipos

- Calorímetro de la firma Thermometric, TamAir con 8 canales de capacidad (Figura 2.9)
- Balanza analítica
- Pipetas
- Espátulas plásticas
- Mezcladora de eje vertical
- Recipientes de calorimetría



Figura 2.9. Calorímetro isotérmico de la firma Thermometric, TamAir

Materiales

- Arcilla calcinada
- Hidróxido de potasio
- Hidróxido de calcio
- Sulfato de potasio
- Agua destilada

2.8.1.2 Procedimiento

1. Inicialmente fue calibrado el equipo a una escala máxima de 600mW con el fin de incrementar la resolución y hallar las ecuaciones de conversión de mV a mW para cada canal empleado.
2. Luego se prepararon las pastas, donde se utilizó un 30 % de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en sustitución de arcilla calcinada y se empleó una relación agua/sólido = 1,2 para asegurar un exceso de agua para la reacción de hidratación y la laborabilidad de las pastas. Además, se utilizó agua destilada como referencia. No se empleó aditivo. Se prepararon 47 g de pasta con el siguiente procedimiento:
 - Pesaje de los materiales
 - Se mezclaron los materiales en la mezcladora de eje vertical por 2 minutos a 1600 r.p.m
 - De los 47 g preparados, se extrajeron 15 g de esta pasta resultante en pequeños envases destinados para este tipo de ensayo.
 - Se colocaron los envases en el calorímetro por cinco días consecutivos.

Todos los ensayos se realizaron a 30°C con lecturas cada 60 segundos, por cinco, es decir, durante 120 horas utilizando un ordenador conectado al equipo. Las curvas de flujo de calor registradas fueron normalizadas a la masa de la muestra e integradas para convertirlas en curvas de calor total liberado en el tiempo.

2.8.1.3 Proporciones

En el ensayo se realizó una réplica por cada serie, cada una con una proporción de arcilla calcinada de un 5 g, hidróxido de potasio 0,1 g, hidróxido de calcio 15g, sulfato de potasio 0,5 g y 24 g de agua destilada.

2.8.2 Evaluación del comportamiento reológico por el Método del Minicono

El procedimiento que se llevó a cabo para realizar este ensayo, se realizó según la NC-235: 2012” Pastas de Cemento - Determinación de la Plasticidad y su variación en el tiempo por el Método del Minicono”. Este método se utiliza para ensayos reológicos de pastas de cemento. El mismo permite evaluar, de manera rápida, una serie de variables experimentales empleando mínimas cantidades de cemento. El método se basa en la medición del área de esparcimiento alcanzada por la pastilla conformada como consecuencia de la caída por gravedad al retirar el recipiente troncocónico que la contiene. Como resultado de este ensayo, se muestra la figura 2.10 (a, b, c).

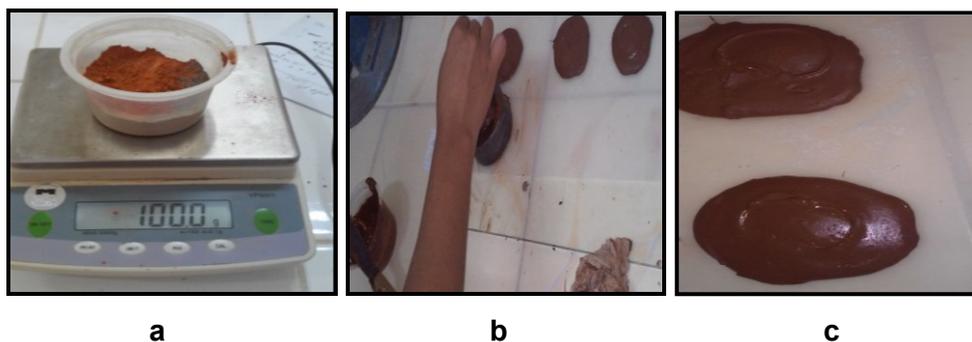


Figura 2.10. Ensayo del Minicono, para evaluar la reología de las pastas. a. pesaje de los materiales, b. elaboración de las pastillas, c. pastillas resultantes.

Para el patrón se utilizaron 100 g de cemento P-35; mientras que para cada muestra (de cada uno de los 2 compósitos, y para cada temperatura de calcinación de la arcilla,

700°C, 800°C y 850°C) se utilizó una dosificación de 70 g de cemento P-35 y 30 g de arcilla calcinada.

Se utilizó una relación $a/c=0,5$; ya que al utilizar una relación $a/c=0,4$ y $a/c=0,45$ no se lograba la plasticidad de la mezcla.

El mezclado de los materiales se realizó a 250 r.p.m, según lo establecido en la norma (NC-235: 2012 “Pastas de Cemento - Determinación de la Plasticidad y su variación en el tiempo por el Método del Minicono”).

2.8.2.1 Utensilios, equipos y materiales

Utensilios y equipos

- Minicono: molde troncocónico
- Mezcladora de eje vertical con velocidad variable de 250 r.p.m. a 2 100 r.p.m
- Beaker o recipiente cilíndrico plástico de 1000 ml
- Plancha de vidrio
- Balanza analítica de 0,001 g de precisión
- Cronómetro
- Pie de Rey con 0.1 mm de precisión
- Espátula
- Varilla de vidrio de 5 mm de diámetro

Materiales

- Cemento P-35
- Arcilla calcinada
- Agua potable

2.8.2.2 Procedimiento

1. Se pesan los materiales, según las dosificaciones correspondientes al patrón (100g de cemento) o a la muestra (70g de cemento P-35 y 30g de arcilla calcinada) y se vierten en el beaker o recipiente cilíndrico e inmediatamente se vierte la cantidad de agua calculada para la relación agua/cemento establecida.
2. Se introduce la paleta de la mezcladora dentro del beaker y se pone en movimiento a la velocidad de 250 r.p.m. durante dos minutos.

3. Se detiene el mezclado, se tapa el recipiente y se deja reposar la mezcla durante tres minutos
4. Se pone nuevamente en movimiento la mezcladora y se mezcla durante dos minutos finales.
5. Se coloca el minicono sobre la placa de acrílico o vidrio.
6. Se detiene la mezcladora.
7. Se vierte la pasta con la ayuda de la varilla Dentro del minicono.
8. Se enrasa con la espátula y se elimina el exceso de pasta en el extremo superior y lateral del minicono.
9. Se mantiene en reposo el minicono durante un minuto y se levanta verticalmente con movimiento rápido dejando caer la pasta hasta que la superficie interior del minicono quede completamente limpia.
10. La pasta formará una pastilla circular que se mantiene en reposo durante 24 horas como mínimo hasta su total endurecimiento.

2.8.2.3 Proporciones

En el ensayo se realizaron tres réplicas tanto del patrón como de cada muestra, para garantizar que los resultados sean representativos. Se utilizaron como proporciones para cada serie, un 70 % de cemento P-35, 30 % de arcilla calcinada y una relación $a/c=0,5$.

En el caso de la muestra patrón se empleó un 100% de cemento P-35.

En ninguna serie se utilizó aditivo.

2.8.3 Evaluación de la reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia a la compresión en morteros normalizados

Este ensayo se debe realizar a tres edades diferentes (3, 7 y 28 días), pero debido a la ausencia de la fracción I de la arena normalizada en el laboratorio de materiales, se decidió realizar este ensayo solo a la edad de 28 días, considerándose esta la más importante para medir la resistencia a compresión de los morteros. Para realizar este ensayo, se utilizó como fuente específica la NC 506: 2013 “Cemento hidráulico - Método de ensayo - Determinación de la resistencia mecánica”.

2.8.3.1 Utensilios, equipos y materiales

Utensilios y equipos:

- Amasadora planetaria
- Moldes de 40mmx40mmx160mm
- Compactadora
- Espátula cronometrada
- Probeta milimetrada
- Máquina de ensayo de resistencia a compresión.

Materiales:

- Cemento P-35
- Arena normalizada (4 fracciones diferentes)
- Aditivo Dynamon SX-32.
- Agua potable
- Arcillas objeto de estudio

2.8.3.2 Procedimiento para la elaboración de las mezclas

1. Se mezcla el cemento con la arena normalizada
2. Luego se vierte el agua dentro del recipiente y se añade el cemento.
3. Inmediatamente se arranca la amasadora a velocidad lenta y después de 30s, y se introduce regularmente toda la arena durante los 30 s siguientes. (Cuando se utiliza arena clasificada por tamaños añadir la cantidad precisa de cada tamaño sucesivamente, empezando por la más gruesa).
4. Poner la amasadora a la velocidad rápida y continuar el amasado durante otros 30 s.
5. Parar la amasadora durante 1 min. 30 s. En los primeros 15 s, quitar, por medio de una espátula de goma, todo el mortero adherido fuera de la zona de amasado y volverlo a la mezcla.
6. Continuar el amasado a la velocidad rápida durante 60 s.

hasta 200 KPa/s aproximadamente hasta alcanzar la rotura y obtener el valor de resistencia a compresión.

Como evidencia de lo antes expuesto se muestra a continuación la figura 2.11.



Figura 2.11. Elaboración de las probetas utilizadas para los ensayos de resistencia a compresión.

2.9 Conclusiones parciales del capítulo

- Las técnicas empleadas para la caracterización química, y la evaluación de la actividad puzolánica de las muestras estudiadas se sustentan en una base sólida que contribuye a la obtención de resultados confiables en la investigación.
- La metodología empleada para la investigación permite conocer la posibilidad de empleo de las arcillas del yacimiento Neptuno, Artemisa como fuente de material cementicio suplementario.

Capítulo III. “Análisis y discusión de los resultados”

En este capítulo se realizó el análisis de los resultados del uso de arcillas calcinadas procedentes del yacimiento Neptuno en Artemisa como material cementicio suplementario lo que permite determinar la temperatura de calcinación idónea a través de los mejores resultados obtenidos. Para llegar a esta conclusión se realizaron ensayos mecánicos y reológico, en todos los casos se compararon los resultados con una muestra patrón confeccionada con las mismas dosificaciones que las muestras estudiadas y bajo las mismas condiciones.

3.1 Análisis de la caracterización química de la arcilla

A partir de los resultados mostrados en la tabla 2.1 se concluye que el compósito 2 presenta un alto contenido de Al_2O_3 y una alta relación Al_2O_3/SiO_2 , y en comparación con el compósito 1, presenta un mayor contenido de estos componentes. Los altos contenidos de Al_2O_3 y de la relación Al_2O_3/SiO_2 están relacionados con una abundante presencia de minerales arcillosos del grupo de las caolinitas. Además, se puede apreciar que el compósito 1 presenta bajos valores de CaO con relación al compósito 2, lo que garantiza una baja presencia de carbonatos, sulfuros y sulfatos que pueden interferir durante el proceso de calcinación. (Tabla 3.1)

Tabla 3.1. Caracterización química de la arcilla de yacimiento Neptuno, en Artemisa (CEMART, 2016)

Muestra	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	SO_3 (%)
Compósito 1	45,78	25,33	14,92	0,49	<0,50	<0,10	<0,50
Compósito 2	45,69	25,96	13,36	0,69	<0,50	<0,10	<0,50

3.2 Análisis de la finura de la arcilla a partir de la caracterización por el tamiz de 45- μm

Los resultados obtenidos al caracterizar la finura de la arcilla se muestran a continuación en la tabla 3.2, los mismos permiten evaluar la finura del material según la norma ASTM C595-2014 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements”.

Tabla 3.2. Caracterización de la finura por el tamiz de 45- μm .

Series analizadas	Temperatura de calcinación	Retenido en el tamiz de 45- μm (%)
C1 ₇₅₀	750°C	18
C1 ₈₀₀	800°C	20
C1 ₈₅₀	850°C	19
C2 ₇₅₀	750°C	13
C2 ₈₀₀	800°C	16
C2 ₈₅₀	850°C	19

Los resultados de este ensayo muestran que la finura alcanzada por la arcilla cumple con lo establecido en la norma para su uso como material cementicio suplementario ya que en cada una de las series analizadas el porcentaje de arcilla retenida en el tamiz de 45- μm es menor que el 20% del total de arcilla analizada que en este caso es 30 g del total de cada muestra según las cantidades que exige dicha norma ($25 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$).

3.3 Análisis de la reactividad puzolánica a través de la Calorimetría Isotérmica (Protocolo R³)

En la figura 3.1 se muestran las curvas de calor acumulado resultantes del Protocolo R³, tanto para el compósito 1 como para el compósito 2, ambos con una muestra de arcilla calcinada a 750°C, 800°C y 850°C.

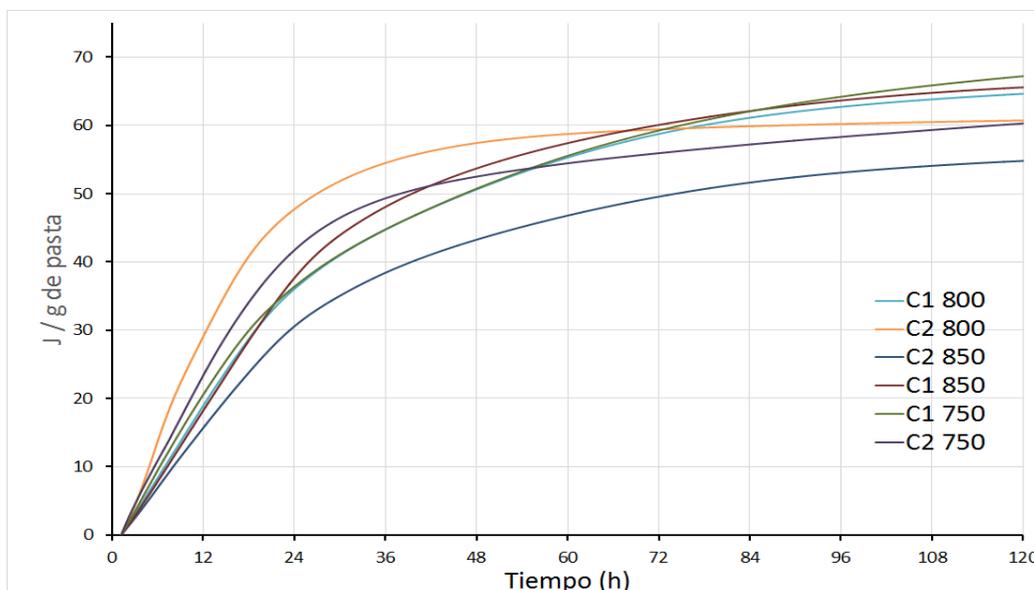


Figura 3.1. Curvas de calor acumulado para el compósito 1 y el compósito 2 con muestras de arcilla calcinada a 750°C, 800°C y 850°C.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el compósito 1 calcinado a 750°C tiene mejor reactividad puzolánica que las demás series, mientras que el compósito 2 a 800°C es el que presenta una cinética de reacción más rápida en comparación con las muestras restantes.

3.4 Determinación de la plasticidad por el Método del Minicono

Los resultados obtenidos en el ensayo del Minicono, tanto las áreas promedias como índice de plasticidad (I.P), para los morteros 70-30 (70 % de cemento y un 30% de arcilla calcinada), se muestran a continuación en la tabla 3.3.

Con el propósito de comparar los resultados se añadió una serie patrón elaborada con el mismo cemento P-35, empleándose también como punto de referencia en los ensayos de resistencia a la compresión. Además, se utilizó la misma elaboración de los morteros 70-30. En todas las series fue utilizada una relación agua/cemento de 0.5 que también fue utilizada en el ensayo de resistencia a compresión.

Tabla 3.3. Valores de índice de área promedio e índice de plasticidad promedio de los morteros 70-30.

Serie	Promedio de los diámetros(mm)	Áreas promedios (mm ²)	Índice de plasticidad promedio %
P-35	68,53	3688,51	-
C1 ₇₅₀	62,56	3221,26	12,67
C1 ₈₀₀	72,67	4147,63	12,45
C1 ₈₅₀	60,90	2912,89	21,03
2 ₇₅₀	59,08	2741,39	25,67
C2 ₈₀₀	51,21	2059,68	44,16
C2 ₈₅₀	52,32	2149,90	41,71

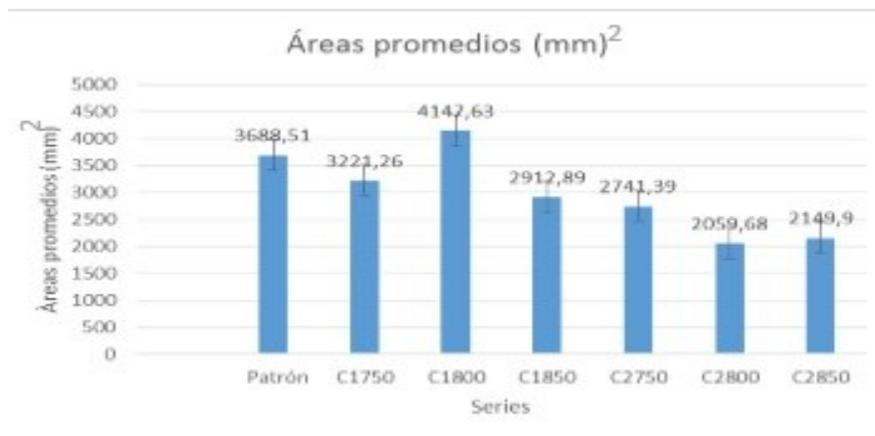


Figura 3.2. Áreas promedios resultantes del ensayo del Minicono para los 2 compósitos calcinados a 750°C,800°C y a 850°C.

A partir de los resultados anteriores mostrados en la tabla 3.3 y en la figura 3.2 se concluye que el compósito 1 con una muestra de arcilla calcinada a 800°C presenta un mejor comportamiento reológico con respecto a las demás muestras, ya que se obtuvo un valor de área superior al de la muestra patrón, por tanto, la serie C1₈₀₀ es la más fluida de todas y con mejores condiciones de laborabilidad. A pesar de que en el compósito 2 no existe ningún área mayor que la de la muestra patrón, se puede destacar que la arcilla calcinada a 750°C del compósito 2 presenta mayor reología que cuando es calcinada a las temperaturas de 800°C y 850°C.

Los bajos valores obtenidos del índice de plasticidad resultante para cada una de las series permiten concluir que la arcilla tiene una influencia severamente negativa en el comportamiento reológico sobre las pastas de cemento. Como valor de referencia para el índice de plasticidad se toma el 100%.

3.4.1 Análisis estadístico del ensayo del Minicono

El ensayo del Minicono se realizó con un nivel de confianza del 95% y los valores resultantes por el método estadístico de desviación estándar indican que no existe probabilidad de error en el caso de las series P-35, C1₇₅₀, C1₈₀₀, C2₈₀₀, ya que los valores son inferiores al 5%, mientras que para las series C1₈₅₀, C2₇₅₀, y C2₈₅₀ existe una mínima probabilidad de error, ya que exceden, en pequeñas diferencias, el 5 %, lo que significa que la dispersión de los resultados es muy grande, lo que le quita confiabilidad al ensayo (Tabla 3.4)

Tabla 3.4. Valores de desviación estándar

Serie	Valores de desviación estándar
P-35	2,95
C1₇₅₀	2,59
C1₈₀₀	3,92
C1₈₅₀	6,75
C2₇₅₀	6,17
C2₈₀₀	0,57
C2₈₅₀	5,25

3.5 Análisis de los resultados de resistencia a compresión de morteros normalizados

Los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días muestran las potencialidades de las arcillas calcinadas para la producción de LC², para ser usado como material puzolánico indicando altos valores de resistencia. Para el estudio se intentó trabajar sin aditivo lo que resultó imposible por la nula laborabilidad que presentó la mezcla realizada para conformar las probetas objeto de estudio, empleándose como aditivo el SX-32. La tabla 3.5 muestra los valores de resistencia a los 28 días para los compósitos 1 y 2 calcinados a 750°C, 800°C y 850°C, así como los de la muestra patrón realizada con cemento P-35, en esta última no se utiliza aditivo, ya que aumenta exageradamente la fluidez de la mezcla.

Tabla 3.5. Valores de resistencia a compresión a los 28 días.

Serie	Valores de resistencia a compresión MPa
C1₇₅₀	42,1
C1₈₀₀	43,2
C1₈₅₀	40,6
C2₇₅₀	43,0
C2₈₀₀	43,4
C2₈₅₀	40,97

Con este ensayo se realiza una comparación entre la muestra patrón y las muestras con arcillas calcinadas, observándose que el valor de resistencia de la muestra patrón es inferior al de las muestras con arcilla calcinada. Además, se evidencia que los mayores valores de resistencia a la compresión las presentan el compósito 1 a 750° y el compósito 2 a 800°C, donde se nota que existe gran coincidencia con relación a la reactividad puzolánica obtenida en el ensayo de Calorimetría Isotérmica, ya que el

compósito 2 a 800°C coincide con ser el mejor en función de la reactividad puzolánica y la resistencia a compresión (Figura 3.4).

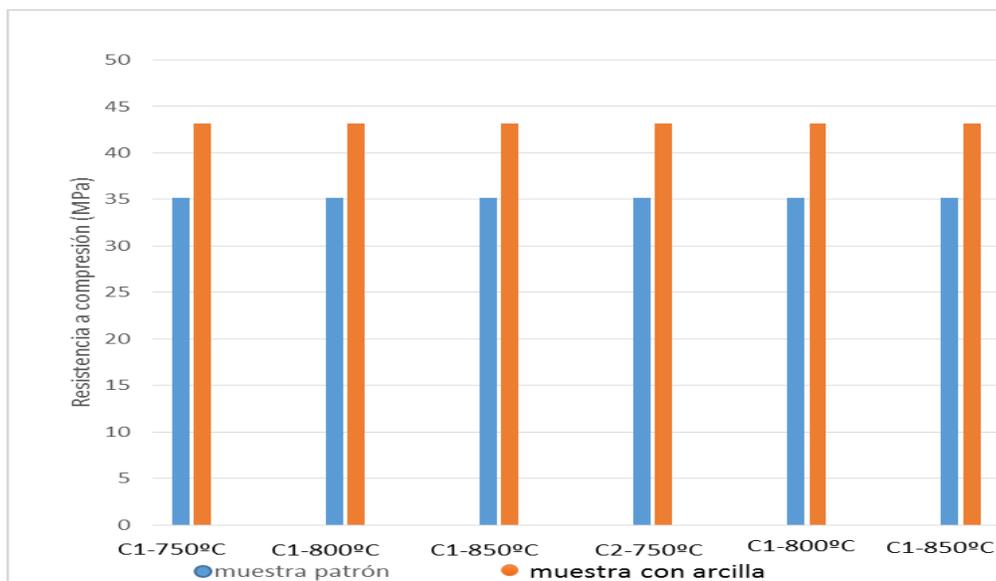


Figura 3.4. Resistencia a compresión a los 28 días para el compósito 1 y el compósito 2, ambos calcinados a 750°C, 800°C y 850°C.

Se puede apreciar, a partir de los resultados obtenidos en este ensayo, que los valores de resistencia de las muestras son similares entre si y a pesar de la carencia de aditivo del patrón, lo superan en un rango de entre 5 y 8 MPa aproximadamente, valores relativamente bajos que permiten deducir que hay muy poca diferencia en cuanto a valores de resistencia entre la muestra patrón y las muestras realizadas con arcillas calcinadas para la producción de LC².

3.5.1 Análisis estadístico del ensayo de Resistencia a Compresión

El ensayo de Resistencia a Compresión se realizó con un nivel de confianza del 95% y los valores resultantes por el método estadístico de desviación estándar indican que no existe probabilidad de error ni en el patrón ni en las muestras realizadas, ya que los resultados son inferiores al 5% del error, y por tanto existe gran confiabilidad en los resultados obtenidos en este ensayo (Tabla 3.4)

Tabla 3.6. Valores de desviación estándar

Serie	Valores de desviación estándar
P-35	2,13
C1₇₅₀	3,56
C1₈₀₀	2,62
C1₈₅₀	3,04
C2₇₅₀	1,68
C2₈₀₀	1,61
C2₈₅₀	4,37

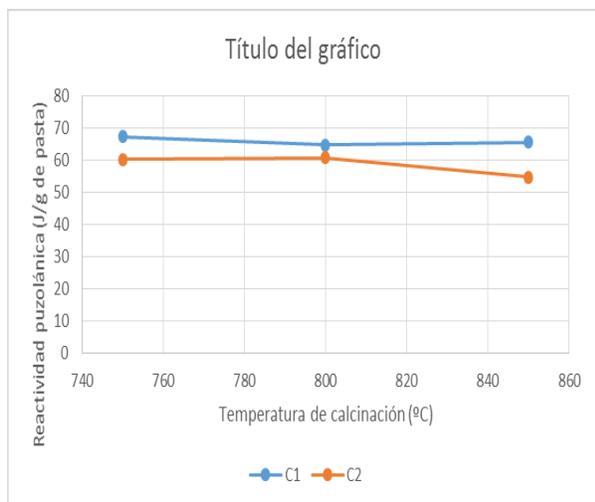
En la figura 3.3 se destaca el ensayo de Resistencia a compresión, realizado en la prensa.



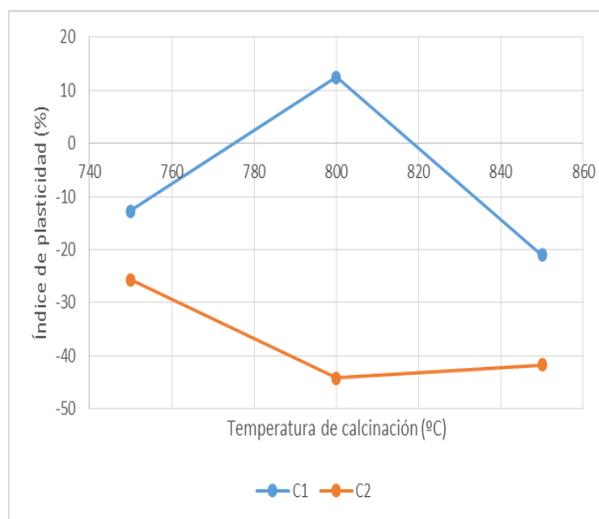
Figura 3.3. Ensayo de Resistencia a Compresión.

3.6 Análisis de la influencia de la temperatura en la reactividad puzolánica y en el comportamiento reológico de las arcillas calcinadas

Las figuras 3.3 (a, b) muestran la influencia de la temperatura en la reactividad puzolánica y la reología, respectivamente, de las arcillas calcinadas procedentes del yacimiento Neptuno, en Artemisa. Notablemente la temperatura de calcinación tiene mayor influencia en el comportamiento reológico de estas arcillas que en la reactividad puzolánica, convirtiéndose así el comportamiento reológico en el parámetro de decisión más relevante para recomendar la mejor temperatura de calcinación en caso de diferencias en los resultados de los ensayos.



a



b

Figura 3.3. Comportamiento de la reactividad puzolánica y de la reología en función de la temperatura de calcinación. a. Influencia de la temperatura en la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas, b. Influencia de la temperatura en el comportamiento reológico de las arcillas calcinadas

Conclusiones generales

- Las arcillas del yacimiento Neptuno, en Artemisa pueden ser utilizadas para la producción de LC², ya que las mismas se caracterizan químicamente, por presentar un contenido de aluminio superior al 18%, lo que asegura que la caolinita se encuentre por encima del 40%.
- Como parte del resultado del Protocolo R³, se obtiene la mejor temperatura de calcinación en función de la reactividad puzolánica según el ensayo de Calorimetría Isotérmica es 750°C para el compósito 1 y para el compósito 2 es 800°C. En cuanto a los valores resultantes de resistencia a compresión se alcanzaron valores de 43,4 MPa y 43 MPa respectivamente, existiendo una coincidencia en cuanto al compósito 2, ya que fue el de mejor reactividad puzolánica y el que mayor resistencia alcanzó dentro de este compósito.
- Los valores obtenidos en el ensayo del Minicono muestran que el compósito 1 calcinado a 800°C es el que presenta mejor comportamiento reológico y con este una mayor fluidez, mientras que el índice de plasticidad en todos los casos, responde a la influencia marcadamente negativa que presentan las arcillas calcinadas en la reología de las pastas.
- Debido a la diferencia que existe entre los resultados obtenidos en los ensayos de Calorimetría Isotérmica y Minicono, la temperatura de calcinación más propicia es 800°C para el compósito 1 y para el compósito 2 es 750°C ya que la reología es el parámetro de decisión por las marcadas diferencias que posee con relación a la reactividad puzolánica.

Recomendaciones

- Continuar los estudios encaminados al comportamiento reológico de las arcillas calcinadas como material puzolánico en la producción de LC².
- Incrementar la bibliografía referente al LC² para próximos estudios, ya que existe carencia de la misma.

Referencias Bibliográficas

- ACI 2001. ACI Committee Report 232.1R-00 Use of raw or processed natural pozzolans in concrete. A. C ed.
- AITCIN, P. C. 2000. Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow. Cement & Concrete Research 30, 1349-1359.
- ALONSO, S. & PALOMO, A. 2001. Calorimetric Study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixture. Cement & Concrete Research, 31, 25-30.
- ALUJAS, A. 2010a. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes. UCLV.
- ALUJAS, A. 2010b. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes. UCLV.
- AVET, A. S. 2015. Influence of calcite on the reactivity of El Yigre calcined clay (Cuba). In: LAUSANA, E. (ed.). Suiza.
- BARONIO, G. B. 1997. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. Construction and Building Materials, 11.
- BETANCOURT, S. 2012. Cemento Portland Ordinario. Aglomerantes.
- BRIGATTI, G. E. 2006. Structure and mineralogy of clay minerals. Handbook of clay science.
- BROW, G. E. 1961. The X- ray Identification and Structures of Clay Minerals London. Jarrold & Sons Ltd.
- CASTILLO, R. 2010. Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. Revista Ingeniería de Construcción.
- COSTOYA, M. F. 2008. Effect of Particle Size on the Hydration Kinetics and Microestructural Development of Tricalcium Silicate.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. 1992. An introduction to the rock-forming minerals. London: Harlow: Longman.
- F. MARTIRENA, K. S. 2011. Context of Cementitious Materials in developing countries. Pre Congressal courses.
- FERNÁNDEZ, L. R. 2009. Calcined Clayey Soils as Potential Replacement for Cement in Developing Countries. école polytechnique Federale de Lausanne.

- HABERT, G., CHOUPAY, N., ESCADEILLAS, G., GUILLAUME, D. & MONTEL, J. M. 2009. Clay content of argillities: Influence on cement based mortares. *Applied Clay Science*, 43, 322-330.
- HE, C., OSBAECK, B. & MAKOVICKY, E. 1995. Pozzolanic reactions of six principal minerals: Activation, reactivity assesments and technological effects. *Cement & Concrete Research*, 25, 1691-1702.
- HELLER-KALLAI, L. 2006. *Handbook of clay science*.
- HENDRIKS, C. 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. *Forth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. Interlaken.
- MAPEI 2010.
- MARTIRENA, J. F. 2003. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa., UCLV.
- MASSAZZA, F. 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*, 15, 185-214.
- MENDEZ, G., BONAVETTI, V. & IRASSAR, E. F. 2003. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnance slag. *Cement & Concrete Composites*, 25, 61-67.
- PANE, I. & HANSEN, W. 2005. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement & Concrete Research*, 35, 1155-1164.
- POON, C. S., LAM, L., KOU, S., WOUG, Y. L. & WONG, R. 2001. Rate of pozzolanic reation of metakaolin high-performance cement pastes. *Cement & Concrete Research*, 31, 1301-1306.
- RAMACHANDRAN, V. S. 2001. *Hanbook of analitycal techniques in concrete science and technology*.
- RAMLOCHAN, T., THOMAS, M. & GRUBER, K. 2001. The effecto of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement & Concrete Research*, 30, 339-344.
- REBELDE, J. 2016. Zeolita: ¿Dónde está el mineral del siglo? *Juventud rebelde*.
- SHI, C. & DAY, R. L. 2001. Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. *Cement & Concrete Research*, 31, 813-818.

SIVERIO, S. 2016. Evaluación de arcillas de bajo grado de caolinita del depósito El Yigre para la producción de cemento de bajo carbono. UCLV.

TAYLOR, H. F. 1990. Cement Chemistry.

VÁZQUEZ, A. 2016. Evaluación de depósitos arcillosos en la región central de Cuba como fuente de materias primas para la obtención de puzolanas de alta reactividad. UCLV.

VIZCAÍNO, L. 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza., UCLV.

RESTREPO GUTIÉRREZ. , J. C., RESTREPO BAENA, O. J., & TOBÓN, J. I. (13 de MAYO de 2006). EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN EN EL CEMENTO PORTLAND. MEDELLIN, COLOMBIA.

(NC), O. N. (2013). NC TS: 527. LA HABANA.

(NC), O. N. (2013). NC TS:528. LA HABANA.

Alujas, A., Fernández, R., Martirena, J. F., & Quintana, R. (2010). Empleo de arcillas caoliníticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland. Revista CENIC. Ciencias Químicas.

Andrés, I. L. (2014). TESIS DOCTORADO. CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA - CALIZA. SANTA CLARA, VILLA CLARA, CUBA.

Cabrera, Á. F. (23 de febrero de 2017). Cemento de bajo carbono gana espacio en el mundo. Granma, págs. 2,3.

Cementos. (s.f.). Obtenido de www.google.com: www.google.com

Contreras, Y. A. (2015). TRABAJO DE DIPLOMA. Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala. SANTA CLARA, VILLA CLARA, CUBA.

et.al, A. (1994). Cementos .

Gómez, Y. M. (2015). Fabricación y evaluación del comportamiento de cementos de bajo carbono con clínquer de Siguaney y arcilla calcinada de Pontezuela a nivel semi-industrial. . Santa Clara.

Herrada, I. M. (2015). Trabajo de Diploma. Evaluación de yacimientos arcillosos cubanos como fuente de materia prima para la producción de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Hooton. (2011). MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS. MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS.

Ing.), J. F. (2017). LC 3 : de chocolate y Ron. NOTA DE PRENSA.

J., A. S. (2009). Puzolanas. Cuba.

M. C. (2017). Tesis Doctorado. POTENCIALIDADES DE ARCILLAS CAOLINÍTICAS CUBANAS PARA SER EMPLEADAS COMO FUENTE DE MATERIA PRIMA EN LA OBTENCIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS. santa clara, villa clara, Cuba.

Macphee, D. E. (2010). Proyectos y apuntes teórico-prácticos de Ingeniera Civil. Puzolanas. Obtenido de Proyectos y apuntes teórico-prácticos de Ingeniera Civil. Puzolanas: www.google.com

Martínez, A. R. (noviembre de 2014). Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana. Estudio del sector cementero a nivel mundial y y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana. Valencia, España.

Martirena, A. A. (2016). PRESENTACIÓN A COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN No. 22 “CEMENTO Y CAL”. INFORMACION COMPLEMENTARIA REFERENTE AL ESTUDIO DE YACIMIENTOS ARCILLOSOS CUBANOS. SANTA CLARA.

Martirena, F. (21 de Febrero de 2017). EcoSur. Obtenido de EcoSur: <http://www.ecosur.com>

Palomo, A. a. (2001). FUNDAMENTOS DE QUÍMICA. FUNDAMENTOS DE QUÍMICA. CALORIMETRIA.

Pérez, A. V. (2016). Trabajo de Diploma. Evaluación de depósitos arcillosos en la región central de Cuba como fuente de materias primas para la obtención de puzolanas de alta reactividad. SANTA CLARA, CUBA.

Reyes, M. C. (2017). POTENCIALIDADES DE ARCILLAS CAOLINÍTICAS CUBANAS PARA SER EMPLEADAS COMO FUENTE DE MATERIA PRIMA EN LA OBTENCIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS. SANTA CLARA.

Rodríguez, L. M. (2015). Trabajo de diploma. Formulación de cementos de bajo carbono con sustituciones del 60 y 75 porciento de clínquer por adiciones de caliza- arcilla calcinada en la planta de cemento de Siguaney. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

TIRONI, A. (2013). Trabajo de Tesis Doctoral. MATERIALES CEMENTICIOS DE BAJA ENERGÍA. ACTIVACIÓN TÉRMICA DE ARCILLAS, RELACIÓN ENTRE ESTRUCTURA Y ACTIVIDAD PUZOLÁNICA. CUBA.

Torres, D. V. (2009). Evaluación de la actividad puzolánica de productos de calcinación de una arcilla cubana en sistemas Ca(OH)_2 -puzolana. Santa Clara.

Anexos

Anexo 1. Requerimientos para el empleo de las arcillas como puzolanas según la norma ASTM C595 –2016 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements

Pozzolan and Slag, as applicable	Applicable Test Method
Fineness; Amount retained when wet-sieved on 45- μ m(No. 325) sieve, max, %	20.0
Alkali reactivity of pozzolan for use in Types IP(<15); IT(P<15) and IP(<15)-A;IT(P<15)-A cements, six tests, mortar bar expansion at 91 days, max, %	0.05
Activity index with portland cement, at 28 days, min, %	75
Loss on ignition of pozzolan, max, % C311 Natural pozzolan	10.0
Fly ash	6.0
Silica fume	6.0

Anexo 2. Toma de muestras en el yacimiento Neptuno, en Artemisa (a,b,c,d,e,f)



a

b

c



d



e



f

Anexo 3. Proceso de calcinación de las arcillas (a, b, c, d, e, f)



a



b



c



d



e



f

Anexo 4. Data del ensayo del Minicono

Serie	Promedio de los diámetros(mm)
P-35	68,53
C1₇₅₀	62,56
C1₈₀₀	72,67
C1₈₅₀	60,90
C2₇₅₀	59.08
C2₈₀₀	51,21
C2₈₅₀	52,32