



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

Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico

TESIS EN OPCION AL TITULO DE INGENIERO METALURGICO

Anibal Alvarez Vidal

Moa 2013



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

Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico

TESIS EN OPCION AL TITULO DE INGENIERO METALURGICO

Autor: Anibal Alvarez Vidal	Firma.....
Tutor: Ms.C. Roger Samuel Almenares Reyes	Firma.....
Dr. Carlos Alberto Leyva Rodríguez	Firma.....
Ing. Yosbel Guerra González	Firma.....

PENSAMIENTO

Pensamiento

En este mundo no existen barreras para aquellas personas que ponen su empeño y sacrificio, en aras de alcanzar sus sueños.

Anibal Alvarez Vidal

DEDICATORIA

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos mis amigos y compañeros de aula que de cierta forma me ayudaron a hacer realidad este sueño.

....A mi querida madre y mi querido padre por su amor, confianza y sacrificio durante todos estos años de estudios y cultivar en mí desde niño el gusto por las ciencias.

....A mi hermana Yelena que la amo tanto, por su apoyo y entera confianza en que yo si podía realizar mi sueño.

.....A mi abuelita Virgen que la quiero con la vida.

.....A mi novia (Daylin), por su amor y apoyo en todo momento.

.....A toda mi familia que ha sido clave durante este período.

.....A mi amigo Adonis por su ayuda desinteresada.

.....A todas mis amistades y personas que quiero.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

A la revolución cubana por haberme dado la oportunidad de realizarme como un profesional.

A mi familia por haberme dado la fuerza y la confianza suficiente para formarme como profesional, principalmente a mis padres, mi hermana, tías, tíos, primos y vecinos.

A mi novia (Daylin), por su AMOR, dedicación, comprensión y confianza.

A mi tutor Roger Samuel Almenares por compartir su sabiduría.

Al Doctor Amaury Palacio por su apoyo incondicional.

A todos mis profesores por haberme ayudado a formarme como un profesional en el transcurso de estos cinco años.

A todas mis amistades.

A mis compañeros de aula por haberme apoyado en los buenos y malos momentos.

RESUMEN

RESUMEN

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

ABSTRACT

ABSTRACT

In the present investigation, a study of the influence of temperature on the thermal activation of a clay material from the region of Cayo Guam in the municipality of Moa, in order to evaluate the pozzolanic reactivity of the products of calcination and their potential use as a partial replacement for Portland cement. The clay sample was thermally activated at temperatures of 600, 750 and 900° C, for a time of 60 minutes. Pozzolanic activity of the products of calcination was evaluated from mechanical strength tests on mortar with 30% replacement of Portland cement by calcined clay. Substitution mortars with calcined clay at 600 ° C were the pozzolanic activity showed better for both 7 and 28 days of curing, followed by calcined clay made from 750 and 900 ° C respectively.

INDICE

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL	5
1.1 Generalidades del cemento Pórtland.....	5
1.2 Hidratación de cemento Pórtland.....	6
1.3 Puzolanas. Generalidades.....	7
1.4 Actividad puzolánica.....	9
1.5 Clasificación de las puzolanas según el origen.....	10
1.6 Características generales de las arcillas.....	11
1.6.1 Propiedades físico-químicas de las arcillas.....	12
1.6.2 Clasificación de los minerales arcillosos.....	15
1.6.3 Aplicaciones Industriales de las arcillas.....	16
1.7 Métodos de Activación de las arcillas.....	16
1.7.1 Activación térmica de las arcillas.....	16
Conclusiones parciales.....	20
CAPITULO 2 MATERIALES Y METODOS	21
2.1 Diseño de la Investigación.....	21
2.2 Diseño de Experimento.....	21
2.3 Características de la arcillas de la región de Cayo Guam.....	22
2.4 Toma y selección de la muestra de arcilla.....	23
2.5 Toma y selección de la muestra de arena.....	23
2.6 Preparación de los morteros.....	23
2.7 Ensayos de resistencia mecánica.....	29
2.7.1 Ensayo de resistencia a la flexotracción.....	30
2.7.2 Ensayo de resistencia a la compresión.....	30
2.8 Determinación del índice de actividad resistente.....	31
Conclusiones parciales.....	32

CAPITULO 3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1 Resistencias mecánicas.....	33
3.1.1 Resistencia a la flexotracción	33
3.1.2 Resistencia a la compresión.....	34
3.2 Índice de puzolanidad	36
3.3 Valoración cualitativa del empleo de las arcillas activadas térmicamente en la industria del cemento.	38
Conclusiones parciales	41
CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFIA.....	44
ANEXOS	

INTRODUCCION

INTRODUCCION

El cemento Pórtland se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor volumen de producción a nivel mundial. Si se compara con otros materiales de construcción como el plástico, el aluminio, la madera, el acero o el vidrio, los costos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de masa son muy bajos. Sin embargo, por sus altos volúmenes de producción, su elaboración está asociada a un alto consumo de energía y a grandes volúmenes de emisiones de dióxido de carbono, factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental (Martirena, 2009), en un momento en que el cuidado del entorno y la eficiencia en la utilización de los recursos energéticos deben estar entre las principales prioridades de la humanidad.

Entre las soluciones más extendidas a estos problemas, se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico o puzolanas al cemento Pórtland, con lo cual se incrementa o se mantiene en general su resistencia mecánica y durabilidad frente a un determinado número de agentes ambientales. Al mismo tiempo, al reducirse el contenido de cemento Pórtland en el aglomerante, se favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante.

Existe una amplia variedad de materiales que pueden ser empleados como puzolanas, algunos se encuentran ya en explotación como es el caso de las cenizas volantes, las escorias siderúrgicas o el humo de sílice (Sabir, 2001). En Cuba, estas alternativas para la obtención de materiales puzolánicos no son viables, puesto que las fuentes de obtención de estos productos, no producen grandes volúmenes que permitan satisfacer la demanda del cemento Pórtland, razón por la cual surge la necesidad de buscar y desarrollar nuevas alternativas para la producción de estos materiales.

En los últimos años en nuestro país se ha incrementado el interés en la obtención de materiales puzolánicos a partir del empleo de las arcillas activadas térmicamente, por su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas (Souza, 2005). Los investigadores han centrado su atención en los escasos yacimientos de caolinitas de alta pureza que se encuentran localizados en su gran mayoría en la Isla de la Juventud (Rivera, 2009). No obstante en nuestra región, los depósitos más abundantes son los que contienen fracción arcillosa multicomponentes, pero estos son todavía poco comprendido y estudiado.

Las potencialidades que ofrecen los yacimientos arcillosos con moderados contenidos de caolinitas y presencia de otras fases arcillosas como fuente de materias primas para la obtención de puzolanas mediante activación térmica, permite ampliar la disponibilidad de fuentes de materiales puzolánicos en el país, al mismo tiempo que se potencializa la utilización de recursos minerales con bajo valor agregado en comparación con otras fuentes de puzolanas como las tobas zeolitizadas o las caolinitas de alta pureza. Actualmente no se han reportado investigaciones con estos tipos de depósitos, aunque sí se reconoce la importancia de analizar el potencial empleo de las arcillas localmente disponibles como materiales puzolánicos.

Cuba cuenta con yacimientos de arcillas caoliníticas con reservas inferidas en más de 30 millones de toneladas, ampliamente distribuidos por toda la isla. Estas reservas pueden incrementarse ostensiblemente si se tienen en cuenta otros yacimientos arcillosos donde esta fase mineral está presente en bajas o moderadas cantidades. Los minerales arcillosos de la familia de las caolinitas se presentan en abundancia en las zonas tropicales, donde su formación es favorecida por las condiciones ambientales de altas temperaturas y abundante humedad.

Situación Problémica

La obtención de materiales puzolánicos a partir de la utilización de yacimientos con presencia de varias fases arcillosas y no arcillosas, como es el caso de los minerales de la corteza de interperenización sobre grabos presentes en la región de Cayo Guam en el municipio de Moa, demanda el estudio de sus propiedades puzolánicas durante el proceso de activación térmica, lo cual constituye una vía para su aprovechamiento como material cementicio suplementario.

Problema de la Investigación

Insuficiente conocimiento de las propiedades puzolánicas de arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam a partir de su activación térmica, lo cual limita su aprovechamiento como material cementicio suplementario.

Objeto de Estudio

Activación térmica de arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam.

Campo de Acción

Propiedades puzolánicas de arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam activadas térmicamente.

Objetivo General

Determinar el carácter puzolánico de los productos de la calcinación de arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam para su aprovechamiento como material cementicio suplementario.

Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de las condiciones de calcinación en la obtención de un material con potencial carácter puzolánico.
- Caracterizar el comportamiento en morteros de los productos de calcinación como sustitutos parciales del cemento Pórtland.

Tareas

- Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con los materiales puzolánicos y la activación térmica de arcillas para su empleo como puzolanas.
- Activación térmica de las arcillas a diferentes temperaturas.
- Evaluación del potencial carácter puzolánico de los productos obtenidos bajo diferentes condiciones de calcinación, a partir de la determinación del índice de actividad resistente en morteros donde ha sido remplazado el 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada.
- Valoración de las perspectivas de utilización de las arcillas calcinadas como fuente de materiales puzolánicos.

Hipótesis

Si se demuestran las propiedades puzolánicas de las arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam activadas térmicamente, es posible obtener un material puzolánico que permita el reemplazo parcial del cemento Pórtland como aglomerante, sin afectar sus propiedades físico-mecánicas.

CAPITULO 1

CAPITULO 1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

En este capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas discutidos en la bibliografía consultada, acerca de las generalidades del cemento Pórtland, los materiales puzolánicos, las arcillas y su activación térmica, con el objetivo de disponer de los elementos básicos para la realización del presente trabajo.

1.1 Generalidades del cemento Pórtland.

El cemento Pórtland es un aglomerante hidráulico inorgánico, polifásico artificial, que se obtiene a partir de un producto intermedio denominado clinker, que no es más que una mezcla en proporciones preestablecidas de carbonato de calcio (caliza) y de un aluminosilicato (arcillas o margas) u otros materiales de una composición similar, previamente molidos y homogeneizados que generalmente son calcinados en hornos rotatorios a una temperatura de 1480 °C aproximadamente.

Durante el proceso de calcinación se produce una fusión parcial y una recombinación de los componentes de las materias primas dando lugar a nódulos de clinker de 5-50 mm de diámetro, que esencialmente consisten en silicatos de calcio hidráulicos. Posteriormente el clinker es mezclado con un 5 % de yeso (sulfato de calcio dihidrato) y se somete a un proceso de molienda del cual resulta el cemento Pórtland.

Su nombre está dado por su semejanza, una vez fraguado, con la famosa piedra caliza blanco-plateada que se extraía de unas canteras existentes en la pequeña península de Pórtland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra.

Durante la década del 90, la producción de cemento Pórtland creció un 55 % en los países en vías de desarrollo, en comparación con un crecimiento de solo el 3 % en los países desarrollados, y se espera que para el año 2020 la demanda de aglomerantes sea de un 120 a un 180 % mayor con respecto a los niveles alcanzados en 1990, debido fundamentalmente al crecimiento de los países en vías de desarrollo (Aitcin, 2000).

La composición química media de un cemento Pórtland, según Calleja (1974), está formada por un 62,5 % de CaO, 21 % de SiO₂, 6,5 % de Al₂O₃, un 2,5 % de Fe₂O₃ y otros minoritarios.

Estos son los cuatro componentes principales del cemento Pórtland, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino en forma de silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales.

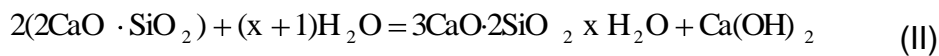
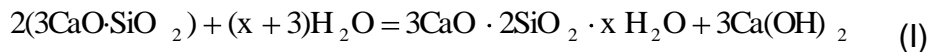
Un clinker de cemento Pórtland de tipo medio contiene:

- Silicato tricálcico (3CaO·SiO₂)40% a 50%
- Silicato bicálcico (2CaO·SiO₂)20% a 30%
- Aluminato tricálcico (3CaO·Al₂O₃)10% a 15%
- Aluminato ferrito tetracálcico (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) 5% a 10%

1.2 Hidratación de cemento Pórtland

Cuando el cemento Pórtland es mezclado con agua ocurren una serie de reacciones químicas responsables del endurecimiento de la pasta que son designadas genéricamente como reacciones de hidratación, y los compuestos químicos resultantes de estas reacciones, como productos de hidratación o hidratos. La hidratación del silicato tricálcico (3CaO·SiO₂) impuro, también llamado Alita, conduce a la formación del hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), también denominado portlandita, y de silicatos de calcio hidratados con una estructura amorfa y de estequiometría variable, que son denotados de manera genérica como silicato de calcio hidratado (CaO·SiO₂·H₂O).

Según Jiménez (1982) las dos principales reacciones de hidratación, que originan el proceso de fraguado y endurecimiento son:



El silicato tricálcico es el compuesto activo por excelencia del cemento pues desarrolla una resistencia inicial elevada y un calor de hidratación también elevado.

Fragua lentamente y tiene un endurecimiento bastante rápido. En los cementos de endurecimiento rápido y en los de alta resistencia aparece en una proporción superior a la habitual.

El silicato bicálcico es el que desarrolla en el cemento la resistencia a largo plazo, es lento en su fraguado y en su endurecimiento. Su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico, por ello los cementos resistentes a los sulfatos llevan un alto contenido de silicato bicálcico. El aluminato tricálcico es el compuesto que gobierna el fraguado y las resistencias a corto plazo. Su estabilidad química es buena frente al agua de mar pero muy débil a los sulfatos. Para retardar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento se añade al clinker piedra de yeso. El aluminatoferrito tetracálcico no participa en la resistencia mecánica, su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación del clinker.

1.3 Puzolanas. Generalidades

Los materiales puzolánicos son una subcategoría dentro de los materiales cementicios suplementarios. La Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) define como puzolanas a aquellos productos naturales o artificiales, silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (Taylor, 1990), además presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables. Bajo esta definición se encierran materiales de muy diferente naturaleza, que van desde rocas y sedimentos a residuos industriales o agrícolas y arcillas calcinadas.

En la actualidad, la mayor parte del volumen de materiales cementicios suplementarios empleados a escala global en la sustitución del clinker lo constituyen subproductos del sector industrial como las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio) (Alujas, 2010).

Mientras tanto, otras abundantes reservas de materiales puzolánicos permanecen prácticamente inexploradas, como se muestra en la figura 1.1.

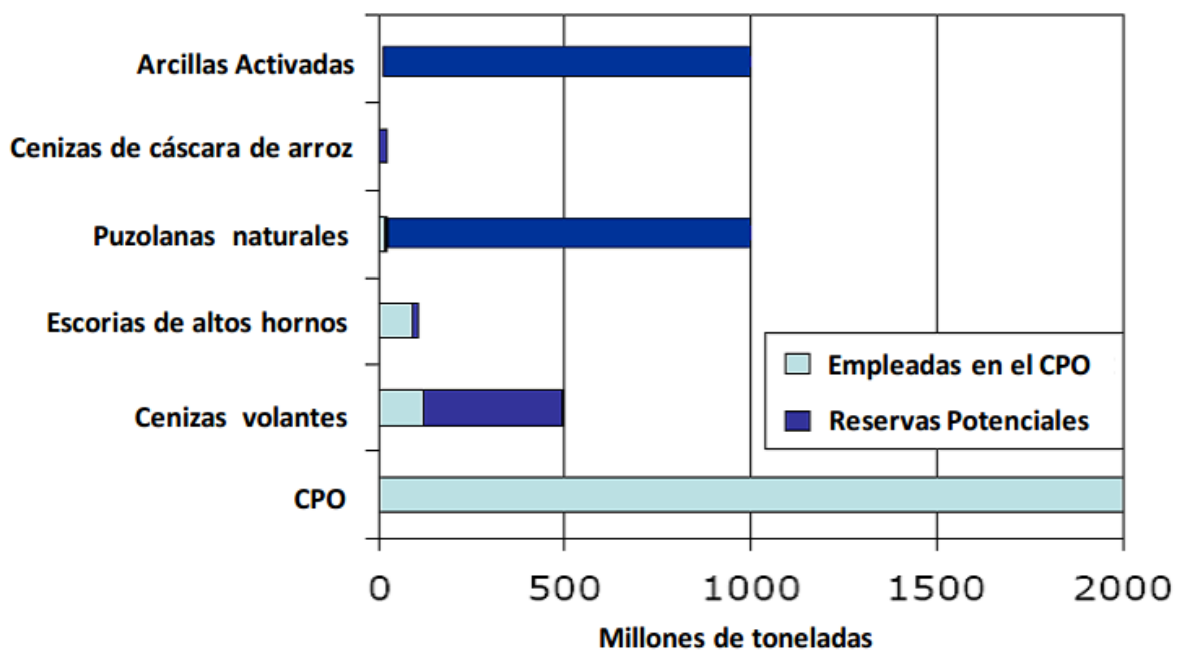
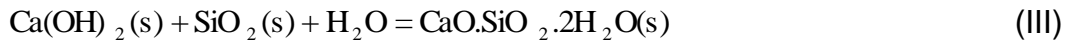


Figura 1.1 Empleo de materiales puzolánicos en la sustitución parcial del cemento Pórtland (tomado de Alujas, (2010)).

La utilización de las puzolanas en el cemento Pórtland, en términos generales, presenta un efecto en la disminución del calor de hidratación debido a que tiene un menor porcentaje de los compuestos responsables de la elevación de la temperatura durante el fraguado del cemento, lo que implica una menor formación de capilares y por ende una mayor densidad, además se necesita una menor cantidad de agua para el curado de los elementos realizados con este tipo de mezclas. Importante destacar que estas adiciones activas mejoran el desarrollo de la resistencia mecánica y la durabilidad de los morteros y hormigones.

1.4 Actividad puzolánica

La actividad puzolánica se refiere a la capacidad y a la velocidad de reacción entre los aluminosilicatos de la puzolana y el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento para formar productos cementantes. La reacción principal que tiene lugar en estos sistemas es la que se describe en la reacción (III), donde se obtiene como producto el silicato de calcio hidratado.



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

La composición de los (silicatos de calcio hidratados) formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los (silicatos de calcio hidratados) formados durante la reacción de hidratación del cemento Pórtland, 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 (silicatos de calcio hidratados), incrementando así la relación Al/Ca en los (silicatos de calcio hidratados), en cuyo caso se refiere a estas fases como $(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$. Al igual que las principales reacciones de hidratación del cemento Pórtland, 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.

La actividad puzolánica no se ha podido comprender con claridad debido a la estructura heterogénea de las puzolanas y a la compleja naturaleza de la hidratación (Erdogdu, 1996), no obstante, los principales factores que intervienen en su actividad se pueden ilustrar a continuación (Erdogan, 2002):

- La actividad puzolánica es mayor cuando el contenido de óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) o el contenido de material activo es alto.
- Una puzolana para ser químicamente activa, debe tener una estructura amorfa.
- Las partículas puzolánicas deben ser suficientemente finas para reaccionar con el hidróxido de calcio.

Por tanto, para evaluar una puzolana se debe tener en cuenta, su área superficial, composición química y mineralogía.

1.5 Clasificación de las puzolanas según el origen.

Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos, con el objeto de aumentar su reactividad. Estas puzolanas tratadas, aunque son naturales por su origen, se pueden considerar como artificiales por causa del tratamiento que reciben. Podrían denominarse entonces puzolanas mixtas o intermedias.

Puzolanas Naturales: Son productos minerales con características composicionales (silico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento.

Las puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico.

- Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y “cenizas” volcánicas que, como materiales piroclásticos incoherentes procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio, que más tarde por procesos geológicos de enterramiento estas cenizas se convierten en tobas, las cuales son rocas volcánicas bastante porosas, característica que les confiere una gran superficie interna favoreciendo su reactividad.

- Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales o plantas (algas diatomeas).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Puzolanas Artificiales: Son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales; tales como, residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, entre otros (Gibbons, 1997).

Puzolanas mixtas o intermedias: Son aquellas puzolanas que, naturales por su origen, se someten a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química. Dentro de éstos se incluyen las zeolitas, suelos, rocas, cascarilla de arroz y las arcillas, un representante típico de éstas últimas es el polvo de ladrillo, obtenido como producto de desecho de la industria de la cerámica roja.

1.6 Características generales de las arcillas

En 1995 la AIPEA (Asociación Internacional Pour L'Etude des Argiles) y la CMS (Clay Minerals Society) definieron el término "arcilla" como un material "natural" compuesto fundamentalmente por "mineral de grano fino", el cual es generalmente "plástico" con apropiada cantidad de agua, que endurece cuando se seca al aire o calcina. Generalmente, la arcilla está constituida por "filosilicatos" pero puede contener otros materiales que imparten plasticidad y que endurecen con el secado. Las arcillas son, por definición, sólidos de granos finos y muchas de sus aplicaciones derivan de ello. Son "filosilicatos" porque los iones de su estructura están arreglados en series de planos paralelos, los cuales están fuertemente unidos en forma de láminas.

La estructura cristalina de las arcillas está formada principalmente por dos grupos: grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos. Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros y octaedros como se observa en la figura I.2.

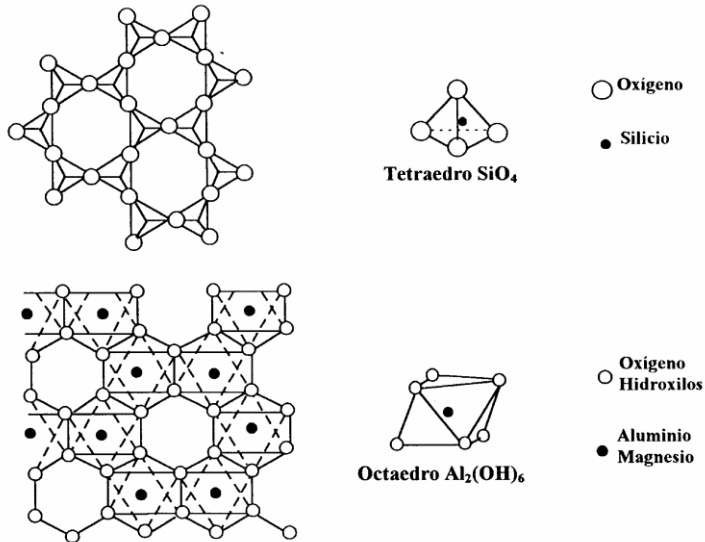


Figura I.2 Representación esquemática de la capa tetraédrica (superior) y octaédrica (inferior).

La estructura final resulta de la condensación de ambas capas para formar las láminas. Para ello se comparten los oxígenos de la capa tetraédrica con los oxígenos libres de la octaédrica. Si un mineral de arcilla presenta un empaquetamiento de una capa tetraédrica y una octaédrica se denomina de tipo 1:1; de una octaédrica entre dos tetraédricas, de tipo 2:1; y si son dos de cada uno, tipo 2:2.

El Si⁴⁺ y el Al³⁺ de la capa tetraédrica y octaédrica respectivamente, pueden ser sustituidos por otros elementos que posean un radio iónico adecuado para adaptarse en la estructura. Este fenómeno, llamado sustitución isomórfica, es responsable de muchas propiedades de los minerales de arcilla.

1.6.1 Propiedades físico-químicas de las arcillas.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)

- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan un valor elevado del área superficial y a su vez una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

- Caolinita de elevada cristalinidad hasta $15 \text{ m}^2/\text{g}$
- Caolinita de baja cristalinidad hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$
- Illita hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$
- Montmorillonita $80\text{-}300 \text{ m}^2/\text{g}$
- Sepiolita $100\text{-}240 \text{ m}^2/\text{g}$
- Paligorskita $100\text{-}200 \text{ m}^2/\text{g}$

Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las arcillas, cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque la hidratación y deshidratación ocurren en dependencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

1.6.2 Clasificación de los minerales arcillosos

El Comité Internacional para Estudios de Arcillas (CIPEA), recomienda las siguientes divisiones y subdivisiones para los minerales de arcillas cristalinas:

a) Silicatos laminares:

Con empaquetamiento 1:1;

Con empaquetamiento 2:1

Con empaquetamiento 2:2

b) Silicatos fibrosos:

Sepiolita

Paligorskita

Los silicatos laminares (filosilicatos) se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Clasificación de los filosilicatos según el tipo de empaquetamiento.

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES T : O 1:1		Caolinita		Antigorita	
	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA	Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	X = 0
TRILAMINARES T : O : T 2 : 1		Pirofilita		Talco	X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
		Vermiculitas		Vermiculitas	X = 0,6-0,9
		Illitas			X = 0,9
		Moscovita		Biotita	X = 1
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita	
			Lepidolita		
T : O . T : O 2 : 1 : 1	CLORITAS				
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita		

Las arcillas constituyen casi el 70 % de la corteza terrestre y la mayor ventaja de estos materiales, aparte de su amplia disponibilidad, es que debido a su estructura laminar, obligan a que las reacciones químicas se produzcan en un plano y no en el espacio tridimensional, lo que hace que estas sean mucho más rápidas. Además, la facilidad para modificar sus propiedades, adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas, justifica su utilización (Castillo, 2010).

1.6.3 Aplicaciones Industriales de las arcillas

Hoy en día las arcillas comerciales, aquellas que sirven como materia prima industrial figuran entre los recursos minerales más importantes, tanto por el volumen explotado como por el valor de la producción. Un 90 % de la producción se dedica, preferentemente a la fabricación de materiales de construcción y agregados. Sólo un 10 % se dedica a otras industrias (fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes, arenas de moldeo, productos químicos, farmacéuticos y en la agricultura)

En general al primer tipo (las que se utilizan en la construcción) se les denomina arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, son arcillas compuestas fundamentalmente por dos o más minerales arcillosos, generalmente illita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filossilicatos (carbonatos y cuarzo).

Al segundo tipo se les denomina arcillas especiales, y son aquellas arcillas constituidas fundamentalmente por un sólo tipo de mineral arcilloso, y sus propiedades dependen esencialmente de las características de ese mineral.

1.7 Métodos de Activación de las arcillas

El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica es la forma más efectiva y más empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Alujas, 2010).

1.7.1 Activación térmica de las arcillas

Los minerales arcillosos no pueden ser empleados como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de la sílice y la alúmina, como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Su 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 su alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón, de ahí

la necesidad de modificar la estructura de las arcillas, para ser empleadas como materiales puzolánicos. (Muller, 2005).

La activación térmica de las arcillas es el proceso que ocurre cuando se le entrega calor al material de manera que el agua estructural que contienen es eliminada, modificándose la estructura cristalina original, esta modificación provoca que el material se vuelva muy reactivo.

Durante la calcinación de las arcillas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde la temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400 °C y los 950 °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 (Alujas, 2010).

El intervalo de temperatura para el cual ocurre la desoxhidrilación de la arcilla y el grado de desorden estructural resultante depende del tipo de arcilla, del grado de cristalinidad que presenta, de su distribución granulométrica y de las sustituciones isomórficas que puedan ocurrir en su estructura (Todor, 1976). La pérdida de los OH⁻ desestabiliza eléctricamente la estructura, especialmente en la zona de la capa octaédrica. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de desoxhidrilación.

Para fases con un bajo grado de orden estructural la reactividad puzolánica se alcanza más rápido y a menores temperaturas que para fases minerales del mismo tipo pero con un alto grado de orden en su estructura (Samet, 2007). Independientemente del tipo de mineral arcilloso, se ha observado que alrededor de los 950 °C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas. La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la arcilla (Shvarzman, 2003).

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 la activación térmica.

Aunque importantes, los criterios de desorden estructural no son los únicos que determinan el potencial carácter puzolánico en una arcilla calcinada. Con el incremento de la temperatura también ocurren importantes cambios morfológicos en el sistema debido a los fenómenos de sinterización y crecimiento de grano, disminuyendo la capacidad de reacción por disminución de la superficie específica, incluso si la fase arcillosa presenta un bajo grado de desordenamiento estructural.

Shvarzman (2003) refiere que a la temperatura de calcinación a la que se alcanza el máximo grado de desorden estructural no siempre se corresponde con la mayor reactividad puzolánica, ya que a medida que aumenta la temperatura de calcinación se establece un compromiso entre el aumento del desorden estructural, el desplazamiento de la distribución granulométrica hacia tamaños de partícula superiores, y la disminución de la superficie específica. Cuando la arcilla es sometida a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicos activos en virtud de las reacciones y las transformaciones en las que, junto a la estructura, constitución mineralógica de partida y a la composición química, juegan importantísimo papel como variables, la temperatura y el tiempo de tratamiento (Alujas, 2010).

Diversos autores han estudiado como influyen en las propiedades del cemento puzolánico, las variables involucradas en el proceso de obtención de puzolanas a partir de la calcinación de arcillas encontradas en su región:

de Oliveira, et al. (2006) estudiaron una arcilla caolinítica procedente de Paraíba, Brasil. Antes de la calcinación, la muestra fue molida con dos finuras diferentes: una hasta 100% pasante por tamíz 75 μm y otra hasta 100% pasante por tamíz 45 μm , y analizada mediante DTA/ATG (Análisis Termodiferencial / Análisis Termogravimétrico). Las temperaturas de calcinación utilizadas fueron de 700, 800 y 900 $^{\circ}\text{C}$ por un período de 2 horas.

La otra variable analizada fue el porcentaje de reemplazo en el cemento: 10, 20, 30 y 40%. La influencia de las distintas variables (granulometría, temperatura calcinación y porcentaje de reemplazo) fue determinada por DRX (Difracción de rayos X). El material más fino fue el que mostró mejor resistencia y concluyeron que cuando la arcilla se calcina a 700 °C, se puede utilizar un reemplazo del 30% en el cemento.

Alujas (2010) realiza un estudio para la obtención de un material puzolánico a partir de la activación térmica de la fracción arcillosa multicomponente proveniente del yacimiento La Moza, en la provincia de Villa Clara, además evalúa la reactividad puzolánica de los productos de calcinación y de su potencial empleo como substitutos parciales del cemento Pórtland. La fracción arcillosa de la roca, después de ser separada por levigación, es activada térmicamente a temperaturas de entre 500 y 1000 °C, para tiempos de calcinación entre 5 y 90 minutos. Los productos de calcinación son caracterizados por DRX, FRX y ATG, para determinar la influencia de las condiciones de calcinación en su potencial carácter puzolánico.

Rossen (2010) evaluó a escala experimental el comportamiento de mezclas Clinker-CaSO₄-CaCO₃-Arcillas Calcinadas, alcanzando a los 7 y a los 28 días resistencias a la compresión en morteros superiores a las de la serie de control, con una reducción en el contenido de clinker de casi un 50 % en masa. Este estudio se realizó enteramente a partir del empleo de materias primas nacionales, incluyendo una arcilla del yacimiento de Pontezuela, en Camagüey, con un contenido de caolinita estimado en un 58 % por ATG y calcinada a 800 °C durante 60 minutos.

Conclusiones parciales

- La amplia disponibilidad de los minerales arcillosos en la corteza terrestre hace de este material, una alternativa atractiva como fuente de materiales puzolánicos.
- Las características químicas y estructurales de las arcillas permiten su transformación en materiales de carácter puzolánico, a partir de su activación térmica. Su rango de activación se encuentra entre 400 y 950 °C, en dependencia de su composición y pureza.

CAPITULO 2

CAPITULO 2 MATERIALES Y METODOS

El objetivo fundamental de este capítulo es describir el diseño experimental, y los materiales empleados para la realización de la presente investigación. El mismo se fundamenta en el método tradicional de experimentación, para analizar la influencia de la temperatura de calcinación de las arcillas, en la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcillas calcinada.

2.1 Diseño de la Investigación

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

2.2 Diseño de Experimento

Por la sencillez y la rapidez de la obtención de los resultados, el método tradicional de experimentación, en las investigaciones exploratorias, lo hacen candidato para ser utilizado en este trabajo. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuales varía solamente un parámetro y se mantienen constante todos los demás. De este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor.

Para el estudio de la actividad puzolánica de las arcillas calcinadas de la región de Cayo Guam, se analizará solamente la influencia de la temperatura de calcinación en la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcillas calcinada.

A continuación se presenta en la tabla 2.1 las condiciones prefijadas para el desarrollo de la investigación.

Tabla 2.1 Condiciones prefijadas en la investigación.

Arcilla de Cayo Guam			
FACTORES/ ETAPAS	Calcinación	Molienda	Dosificación
Temperatura de Calcinación, °C	600, 750 y 900		
Tiempo de Calcinación, min	60		
Granulometría del material, mm		- 0,09	
Porcentaje de sustitución, %			30

2.3 Características de la arcillas de la región de Cayo Guam

La zona de estudio se localiza en la región de Cayo Guam, a unos 4 km de la carretera Moa - Baracoa y al lado izquierdo del camino a la comunidad La Melba, a 80 m aproximadamente. El afloramiento consta de grandes taludes como resultado de potentes cortezas de meteorización desarrollada a partir de la alteración de rocas básicas (gabroides), en el cual se distingue un material de aspecto terroso – arcilloso, con una coloración predominantemente rojiza, según Orozco (1995) estos materiales están compuestos por fracciones arcillosas como la caolinita y poca montmorillonita además de otras fases mineralógicas como la gibbsita, hematita, goetita y pequeñas cantidades de cuarzo y feldespatos. También presenta intercalaciones de grabos pobremente alterados depositados en la zona de forma artificial. Este afloramiento se presenta con más de 200 m de extensión y un espesor promedio de 20 m sobre la superficie.

2.4 Toma y selección de la muestra de arcilla

La selección de la materia prima se realizó escogiendo un corte muy bien expuesto del afloramiento con el objetivo de obtener una muestra representativa a todo lo largo del perfil de meteorización. El tipo de muestreo empleado fue el muestreo por surcos, ya que a partir de esta técnica se puede obtener una mayor representatividad de todo el afloramiento de estudio. Los surcos fueron realizados cada 25 m, a todo lo largo del afloramiento y abarcando toda su profundidad desde la superficie hasta la base. Las muestras colectadas de 8 surcos arrojaron aproximadamente, 100 kg de material, las cuales fueron mezcladas para constituir una muestra homogénea. Esta muestra en su conjunto se trasladó hasta el laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para ser preparada para los ensayos.

2.5 Toma y selección de la muestra de arena

La arena fue tomada de una pila depositada en el patio de la cocina comedor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, procedente de “El Molino Cayo Guam”. El muestreo de la arena se realizó por puntos, para garantizar un muestreo sin desviaciones, la muestra se compuso de tres partes, una tomada en la parte superior, otra en la parte media y la tercera en la parte inferior de la pila. Para facilitar el muestreo se empleó una tabla de madera empujada horizontalmente dentro de la pila, justamente bajo el punto de muestreo para evitar la posterior segregación. Se separó la capa exterior de la pila y se tomó la muestra de material existente bajo ella con la ayuda de una pala. La masa total de la muestra de arena fue de 50 kg. Todo el material fue trasladado al laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para ser homogeneizada y normalizada.

2.6 Preparación de los morteros

En la investigación las materias primas empleadas para la confección de los morteros fueron: arcilla multicomponente de la región de Cayo Guam, arena natural, cemento Pórtland P-350 y agua.

La arcilla y la arena tuvieron que ser preparadas primeramente para poder ser empleadas para la elaboración de los morteros según lo exige la norma cubana **NC-173:2002** y posteriormente realizarles los ensayos de flexotracción y compresión, como se muestra en la figura 2.1.

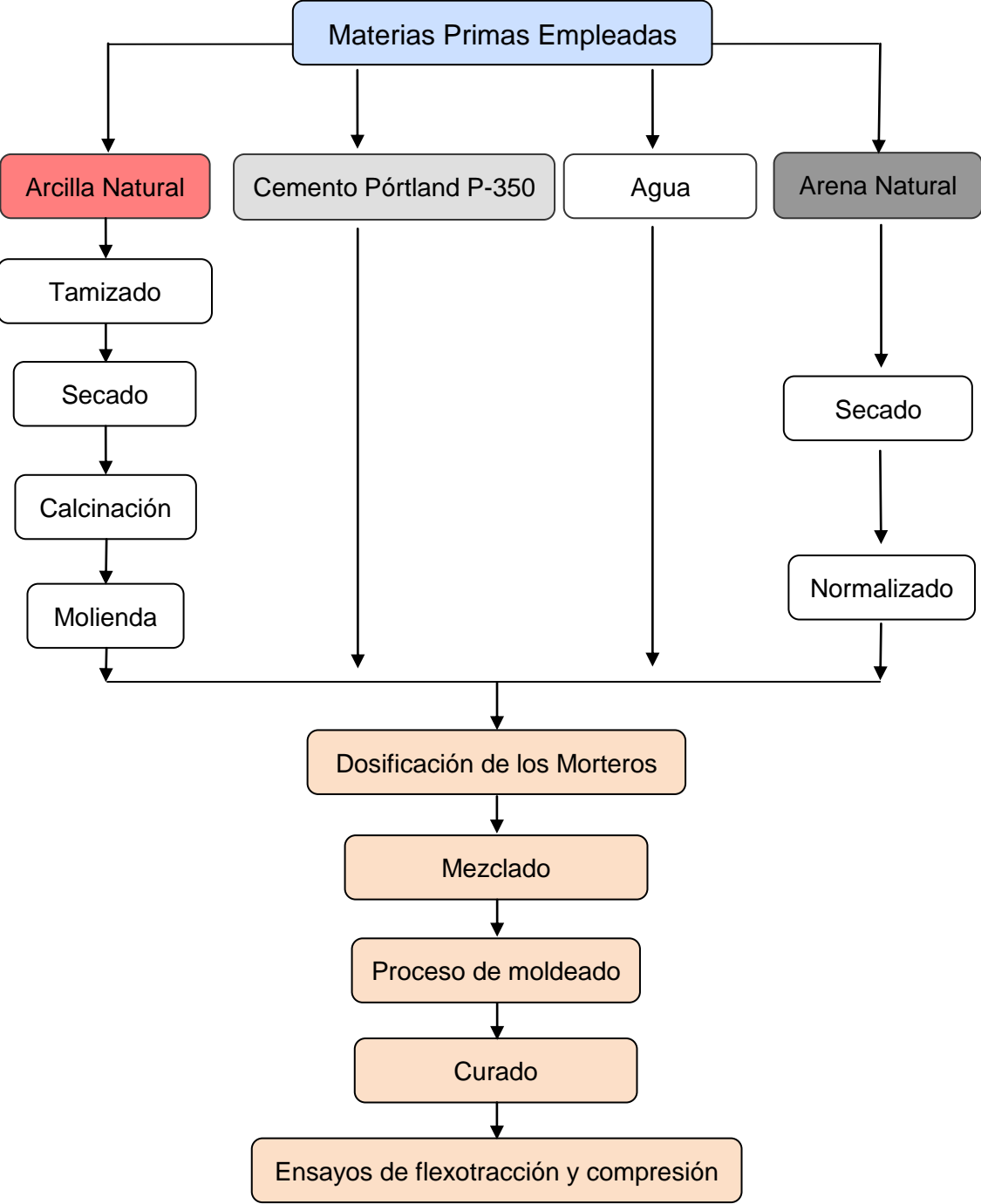


Figura 2.1 Esquema de preparación de los morteros.

A continuación se describen los procesos auxiliares que tuvieron que ser empleados para la preparación de la arcilla y la arena.

Preparación de la arcilla natural

Tamizado: Fue necesario realizar este proceso para poder separar los fragmentos de roca que contenía la muestra y lograr una homogeneidad en el tamaño de las partículas. Para el mismo se empleó un tamiz de 3,15 mm donde el cernido de este tamiz fue empleado para las subsiguientes etapas.

Secado: La arcilla una vez tamizada, fue secada a una temperatura de 120 °C durante un tiempo de 12 horas en una estufa DHG 9146A con rango de temperatura de 0 – 400 °C, con el objetivo de eliminar el agua externa que contenía la misma.

Calcinación: La operación se efectuó en un horno eléctrico J.P Selecta 2000 367 de fabricación española como se muestra en la figura 2.2, el cual presenta un rango de calentamiento de 0 a 1000 °C.

La calcinación del material de estudio se realiza con el objetivo de lograr que todo el material arcilloso pueda activarse térmicamente, para que éste presente una estructura lo más amorfa posible. El material fue calcinado durante 60 minutos para valores de temperatura de 600, 750 y 900 °C.



Figura 2.2 Horno eléctrico J.P Selecta 2000 367

Molienda: El procedimiento se efectuó en un molino de bolas de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud como muestra en figura 2.3. Para cada corrida, se alimentó al molino 600 g de arcilla calcinada y se estableció un tiempo de molienda de 10 minutos, con el objetivo de lograr que el material molido presente un tamaño máximo de partículas de 0,09 mm, similar a la granulometría que presenta el cemento Pórtland P-350.



Figura 2.3 Molino de bolas

Preparación de la arena natural

Secado: La arena fue secada en la estufa DHG 9146A a una temperatura de 120 °C por un tiempo de 12 horas. La misma poseía un contenido de humedad alrededor del 15 %, por lo que era necesario reducir esta cantidad de agua, ya que esta podía influir a la hora de realizar la dosificación de los morteros.

Normalizado: El normalizado de la arena se realizó con el objetivo de obtener una arena con características granulométricas de arena natural para morteros según **ASTM C 897 – 00**. Con ayuda de los tamices de diámetro 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 y 0,075 mm, se procede a cribar el material para garantizar la cantidad de arena adecuada por cada clase de tamaño en los límites permisibles, como se muestra en la tabla 2.2, con lo cual se obtiene una arena normalizada.

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

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

Dosificación de los Morteros: Como se observa en la tabla 2.3 para la realización de la presente investigación se realizaron morteros patrones y morteros con sustitución parcial de un 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada, en los dos casos se utilizó una relación agua/cemento-arcilla 1:1 determinada por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para cada material.

En la investigación se elaboraron un total 24 morteros, 6 morteros de referencia con 100 % de cemento Pórtland y 18 con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada (Anexo 4).

Tabla 2.3 Dosificación de los morteros

MORTEROS	Porcentaje de sustitución, %	Dosificación				Relación Agua/Cemento-Arcilla
		Cemento, g	Arena, g	Arcilla, g	Agua, mL	
Morteros Patrones		450	1350	-	450	1
Morteros con sustitución	30	315	1350	135	450	1

Mezclado: Para la elaboración de la mezcla de los morteros patrones, primeramente se vertió la cantidad establecida de cemento Pórtland en el recipiente, luego se añadió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas como aparecen en la tabla 2.3, el mezclado del agua y cemento se realizó hasta lograr una buena homogenización.

Luego se le agregó la arena sin detener el proceso de mezclado. Después se dejó en reposo durante 30 segundos y se mezcló nuevamente, lo que permitió una buena homogenización de los materiales. De forma análoga se realizó la mezcla de los morteros con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada, con la diferencia que primeramente se realizó la mezcla de cemento y arcilla calcinada y después se añadieron los demás materiales.

Proceso de moldeado: Para el moldeado de los morteros se emplearon moldes de 40mm x 40mm x 160mm donde se vertió la mezcla en dos capas, la primera capa permite que a los 60 segundos se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie, y la segunda capa permite emparejar y enrasar los moldes, después de colocar cada capa, el material fue compactado con ayuda de la compactadora eléctrica como se muestra en la figura 2.4, toda la operación de confección se realizó siguiendo el procedimiento de la norma cubana **NC-173:2002**. Luego de la compactación de la mezcla en los moldes, estos fueron situados en un local donde se garantizó una buena conservación, y pasadas 24 horas fueron desmoldados.



Figura 2.4 Compactadora eléctrica

Curado: Los morteros desmoldados se introdujeron en una piscina con agua hasta edades de curado de (7 y 28 días), el objetivo de esta operación es ver cómo se comporta la resistencia mecánica de los morteros a medida que aumenta el tiempo de curado de los mismos. El procedimiento se realizó a partir de la norma cubana **NC-173:2002**.

2.7 Ensayos de resistencia mecánica

Las propiedades mecánicas y de durabilidad son generalmente usadas como referencia para la evaluación de la calidad general de un material de construcción, debido a que en su aplicación final, el material será empleado en función de su capacidad portante y a la resistencia, generalmente correlacionada con otros parámetros, tales como, la porosidad y la permeabilidad. Es importante asegurar que en la sustitución parcial de cemento Pórtland por materiales puzolánicos derivados de la calcinación de arcillas multicomponentes se obtengan resistencias mecánicas y de durabilidad adecuadas para cumplir con los requerimientos de sus prestaciones de servicio.

La determinación de la resistencia a la flexotracción y a la compresión de los morteros de referencia y los morteros con sustitución de arcillas calcinadas se realizó en una prensa hidráulica de 10 t (toneladas) como muestra en la figura 2.5. Los valores obtenidos en la prensa hidráulica para los ensayos de resistencia a la flexotracción y la compresión son expresados en MPa., el equipo cuenta con los aditamentos que se muestran en la figura 2.6 y 2.7, necesarios para dichos ensayos, uno para realizar la flexión y otro para la compresión, cada aditamento se colocan por separado en el equipo para realizar los ensayos.



Figura 2.5 Prensa Hidráulica

2.7.1 Ensayo de resistencia a la flexotracción

El ensayo de la resistencia a la flexotracción, se realizó con la ayuda de tres cilindros de acero de 10 mm de diámetro; dos de ellos, sobre los cuales se apoya el mortero, situados en un mismo plano y paralelos a la distancia de 100 mm el tercero equidista de los dos primeros y se apoya sobre la cara opuesta de la probeta como muestra la figura 2.6.

Uno de los cilindros de soporte y el cilindro de carga serán capaces de oscilar ligeramente con relación a sus centros para mantener una distribución uniforme de la carga a todo lo ancho del mortero sin someterlo a esfuerzos de torsión.



Figura 2.6 Aditamento para la flexotracción

El mortero se colocó sobre los cilindros de soportes, de forma que su eje longitudinal fuera perpendicular a los ejes de estos y su eje transversal y el del cilindro de carga se encuentren en el mismo plano y paralelos entre sí. Luego se aplicó la fuerza para su rotura.

2.7.2 Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se empleo el aditamento que se muestra en la figura 2.7. El conjunto se colocó entre los platos de 10x10 cm de la prensa hidráulica que aparece en la figura 2.5, cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión.



Figura 2.7 Aditamento para la compresión.

2.8 Determinación del índice de actividad resistente

Para la determinación de este índice de actividad resistente se tomaron los resultados de los ensayos de compresión simple a las diferentes edades a partir de la siguiente ecuación:

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100$$

Donde:

IAR: índice de actividad resistente

A: promedio de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo (arcilla calcinada y cemento Pórtland), MPa.

B: Promedio de la resistencia a la compresión de los morteros patrones (100 % cemento Pórtland), MPa.

El método se recoge en la **ASTM C 311** y la norma cubana **NC TS 527**.

Dado que para determinar el índice de actividad resistente se necesita conocer los valores promedio de las pruebas de resistencia a la compresión de las probetas tanto de los morteros con adición como de los morteros de referencia, y que para confirmar parámetros de calidad de los mismos, se necesita conocer la resistencia a la flexión, se realizaron pruebas de resistencias mecánicas que tributan a su determinación.

Conclusiones parciales

- El diseño experimental planteado permite determinar la influencia de la temperatura de calcinación, sobre la actividad puzolánica de las arcillas objeto de estudio.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicadas en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos para la obtención de resultados adecuados a las normas cubanas e internacionales.
- La arcilla empleada posee características generales adecuadas desde el punto de vista geológico, como punto de partida para su activación térmica.

CAPITULO 3

CAPITULO 3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis de que al activar térmicamente las arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam es posible obtener un material puzolánico, que permita el reemplazo parcial del cemento Pórtland, lo que demuestra las potencialidades de estas arcillas para su aprovechamiento como material cementicio suplementario.

3.1 Resistencias mecánicas

En este acápite se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos de flexotracción y compresión, tanto para los morteros de referencia, como para los morteros con sustitución parcial de cemento Pórtland por arcilla calcinada. Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de cementos, morteros y hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción del mortero. En la investigación se emplean precisamente estas pruebas, para verificar cómo se comporta la resistencia mecánica de los morteros que contienen arcilla calcinada cuando existe un aumento de la temperatura de calcinación de la misma.

3.1.1 Resistencia a la flexotracción

Como se muestra en la figura 3.1, existe un incremento de la resistencia a la flexotracción en el tiempo transcurrido entre los 7 y 28 días, período en el cual los valores medios calculados para ambas edades han pasado de los 0,33, 0,30 y 0,19 MPa a los 0,58, 0,50 y 0,21 MPa (Anexo 2) para los morteros elaborados con 30 % de arcillas calcinadas, y de 0,14 MPa a 0,28 MPa (Anexo 1) para los morteros de referencia, lo que indica que el aumento de las resistencias mecánicas a la flexotracción es directamente proporcional al incremento de la magnitud tiempo.

Sin embargo, ocurre lo contrario con el efecto de la temperatura, sobre lo cual se observa que al incrementarse esta, disminuye la resistencia. Esta tendencia puede estar influenciada por la composición de la arcilla y propiedades del producto calcinado (Fernández, 2009).

También se puede observar que la arcilla calcinada a 600 °C es la que muestra mejor resistencia a la flexotracción tanto para 7 como para 28 días de curado.

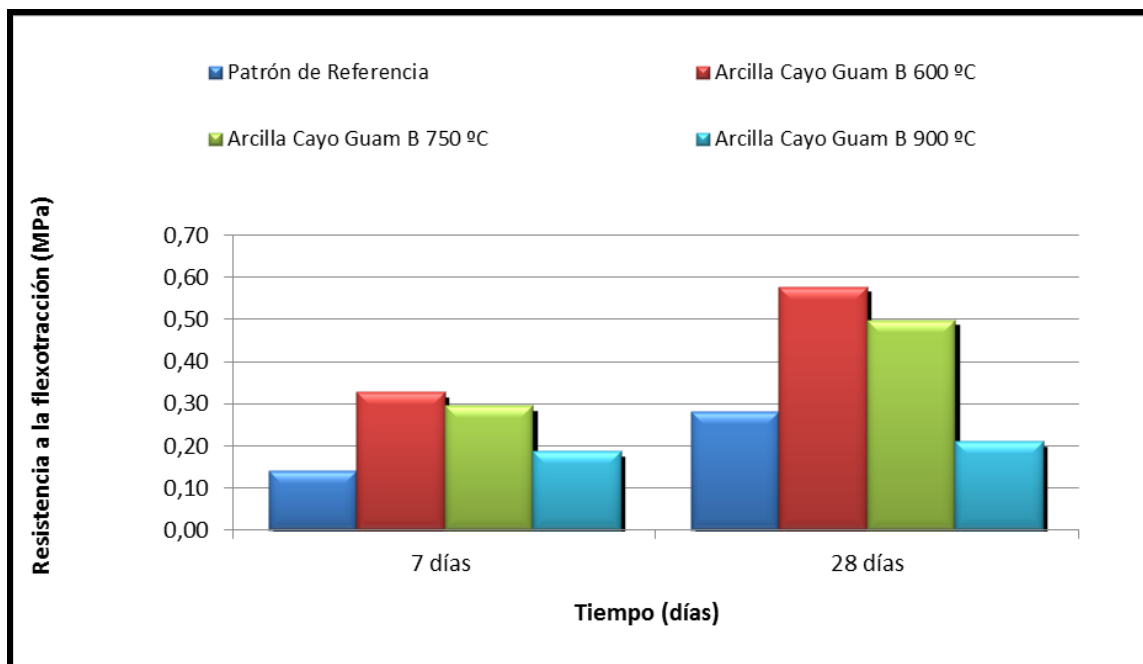


Figura 3.1 Resistencia a la flexotracción de los morteros de referencia y los morteros con 30 % de arcilla calcinada a diferentes temperaturas y edad de curado de 7 y 28 días.

3.1.2 Resistencia a la compresión

La determinación de la resistencia a la compresión permitió observar la contribución de la adición de arcilla calcinada a la mezcla, en el cual se observa que tanto a los 7 como a los 28 días fue superior a los morteros de referencia (Anexo 1 y 3).

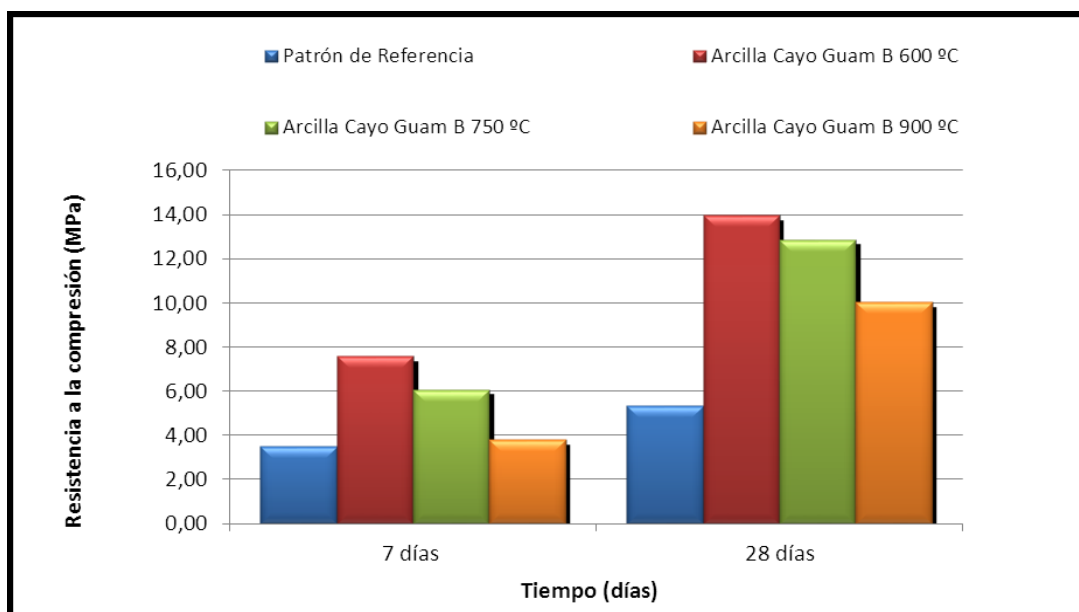


Figura 3.2 Resistencia a la compresión de los morteros de referencia y los morteros con 30 % de arcilla calcinada a diferentes temperaturas y edad de curado de 7 y 28 días.

En la figura 3.2 se puede observar que existe un comportamiento similar al ensayo de flexotracción, pues a medida que transcurre el tiempo de curado aumenta sustancialmente los valores de resistencia a la compresión, tanto para los morteros de referencia como para los morteros con sustitución parcial. En ambos casos se puede apreciar que la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada fue superior a las de los morteros de referencia.

La arcilla calcinada a 600 °C fue la de mejor resultado ante las pruebas de resistencia a la compresión, lo que puede estar dado por la acción activa del desorden estructural de la caolinita. Esto se explica porque según He et al. (1995), la cantidad de material amorfo se incrementa solo modestamente con la calcinación en el intervalo de temperatura de 550 a 800 °C, sin un incremento correspondiente de la resistencia mecánica. Sin embargo no se debe dejar de considerar que la influencia positiva del desorden estructural es parcialmente minimizada por el decrecimiento en la superficie específica y el incremento en el tamaño de las partículas, lo cual podría estar ocurriendo cuando se incrementa la temperatura hasta 750 y 900 °C.

En este caso se puede observar que, en los morteros con sustitución parcial de cemento Pórtland por arcilla calcinada, los valores más pequeños resultaron ser, los de aquellos morteros que contenían 30 % de arcilla calcinada a 900 °C, tanto para 7 como para 28 días, lo que puede indicar que las fases que se forman a esta temperatura tienen poca influencia en el desarrollo de la resistencia a la compresión.

Además, los resultados obtenidos a esta temperatura, puede que estén influenciados por el fenómeno de la reorganización de la estructura o recristalización, el mismo se ha observado que ocurre alrededor de los 950°C 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.

3.2 Índice de puzolanidad

En la tabla 3.1 se representan los valores de los índices de actividad resistente de los morteros elaborados con sustitución parcial del 30 % de cemento Pórtland por arcilla calcinada a diferentes temperaturas.

Tabla 3.1 Índice de actividad resistente de los morteros con arcilla calcinada

Morteros con 30% de arcilla calcinada	Índice de actividad resistente, %	
	7 días	28 días
Morteros con arcilla calcinada 600 °C	218	261
Morteros con arcilla calcinada 750 °C	174	241
Morteros con arcilla calcinada 900 °C	109	188

Como se puede apreciar, los valores del índice de actividad resistente calculados para cada arcilla calcinada, con porcentajes de adición de 30 %, superan el 75 % que establece la norma cubana **NC-TS 527:2007**. De acuerdo a los resultados mostrados, se deduce que el aumento de los valores del índice de actividad resistente es directamente proporcional a la magnitud tiempo. Característica esencial de los materiales puzolánicos.

Se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, mucho después de los períodos normales de fraguado (hasta 28 días), es decir, mientras se produzca hidróxido de calcio la acción inhibidora de la puzolana persiste, por lo que se puede considerar un proceso de larga duración. Según Campolat et al. (2003), en el aspecto práctico, este proceso es beneficioso, ya que con la neutralización del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtendrán morteros y hormigones cada vez más resistentes, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras que se proyecten con el empleo de estas adiciones.

Como influencia directa de la resistencia a la compresión en la tabla 3.1 se muestra que el índice de actividad resistente tiene un comportamiento descendente con respecto al incremento de la temperatura. El mejor resultado se alcanza a la 600 °C, seguido del obtenido a 750 °C y finalmente el alcanzado a 900 °C. En este caso la actividad puzolánica puede verse afectada por la composición estructural y granulométrica de los productos calcinados.

La cantidad de material amorfo es lo que generalmente determina la reactividad de una puzolana, ya que la combinación de la estructura pobremente cristalina o vítrea se le atribuye la reactividad de los materiales puzolánicos (Malhotra y Mehta, 1996), por lo que a pesar de que las normas no especifican la estructura y la morfología que deben tener estos materiales, Gener (2002); Valdez (2004), han demostrado su influencia sobre la actividad puzolánica.

Por otro lado el comportamiento de los materiales analizados, podría tener su explicación en Alujas (2010), ya que este plantea que los criterios de desorden estructural son los más importantes, pero no son los únicos que determinan el potencial carácter puzolánico en una arcilla calcinada.

Con el incremento de la temperatura también ocurren importantes cambios morfológicos en el sistema debido a los fenómenos de sinterización y crecimiento de grano, disminuyendo la capacidad de reacción por disminución de la superficie específica, incluso si la fase arcillosa presenta un bajo grado de desorden estructural.

De forma similar Martin-Calle (1989) refiere que a la temperatura de calcinación a la que se alcanza el máximo grado de desorden estructural no siempre se corresponde con la mayor reactividad puzolánica, pues a medida que aumenta la temperatura de calcinación se establece un compromiso entre el aumento del desorden estructural, el desplazamiento de la distribución granulométrica hacia tamaños de partículas superiores, y la disminución de la superficie específica. Por tal razón, es necesario realizar un estudio más profundo con el empleo de técnicas que permitan explicar el mecanismo de reacción y/o activación de estos materiales a las diferentes temperaturas.

De acuerdo a estos resultados se confirma, que los materiales arcillosos de la región de Cayo Guam poseen actividad puzolánica al ser activados térmicamente. La mejor actividad puzolánica la presenta la arcilla calcinadas a 600 °C y con menor actividad, la calcinada a 750 y 900 °C respectivamente.

3.3 Valoración cualitativa del empleo de las arcillas activadas térmicamente en la industria del cemento.

En este acápite se realiza una valoración cualitativa de los beneficios que puede traer consigo, el empleo de las arcillas activadas térmicamente para su aprovechamiento como material cementicio suplementario en las industrias del cemento.

Las industrias cubanas del cemento presentan altos consumos de energía, tanto de energía eléctrica como de portadores energéticos (combustibles), el consumo anual de las seis fábricas con las que cuenta el país, están alrededor de 240 000 MW·h y 250 000 t de combustible. De acuerdo a las literaturas especializadas Taylor (1967) plantea que para producir una tonelada de clinker se necesita consumir 150 kg de combustibles aproximadamente. En los últimos 15 años las fábricas cubanas estaban promediando los siguientes valores:

En el proceso húmedo el consumo está entre 195-200 kg de combustible y en el proceso seco de 100-110 kg por toneladas de clinker. En la actualidad el consumo de combustible y energía eléctrica se ha incrementado en estas fábricas debido a las transformaciones de expansión que se han llevado a cabo en estas empresas cementeras. La producción de 1 tonelada de clinker produce aproximadamente 1 tonelada de dióxido de carbono (Schneider et al, 2011), esto representa el 4% de la emisión global de dióxido de carbono, y el 11% de la emisión industrial. Durante la calcinación del clinker, aproximadamente el 60 % del dióxido de carbono proviene de la combustión del combustible y el restante 40 % de la descarbonatación de la caliza.

La sustitución de clinker con escoria granulada de alto horno, cenizas volantes y otros componentes minerales, reduce las emisiones de dióxido de carbono en la producción de clinker, incluyendo el proceso de combustión del combustible y las emisiones indirectas (Pounds T.M., 2009). La necesidad de nuevos materiales cementantes suplementarios, surge de la escasez relativa de los materiales cementicios suplementarios clásicos (escoria, ceniza volante) o de su localización (puzolanas naturales en regiones muy alejadas) que ocasiona un importante consumo de energía, impacto ambiental negativo y elevado costo, debido al transporte.

Entre los materiales utilizados como puzolanas, se encuentran las arcillas activadas térmicamente, el rango de temperaturas para su activación es de 450 °C a 950 °C, inferior a la temperatura de clinkerización que es de 1480 °C, lo que implica un menor consumo de energía con la consecuente disminución en la emisión de dióxido de carbono. Además, uno de los productos de la activación térmica de las arcillas es el agua y no el dióxido de carbono, como es el caso de la producción del clinker, factor favorable desde el punto de vista medioambiental en su empleo como materiales puzolánico.

A continuación se muestra algunos beneficios que puede traer consigo, el empleo de las arcillas activadas térmicamente para la obtención de materiales cementicios suplementarios en la industria del cemento:

- Menor costo de producción (ahorro de combustible al disminuir el consumo de clinker).
- 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 trabajabilidad de la mezcla de hormigón, con menor tendencia a la segregación de sus componentes.
- Mayor homogeneidad del hormigón.
- 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 clinker afecta la resistencia química del cemento y del hormigón, exponiéndolo al “lavado químico” que produce la lluvia y la humedad atmosférica.

Conclusiones parciales

- El material arcilloso calcinado a 600 °C fue el que mostró mejor reactividad puzolánica en los morteros, seguido del calcinado a 750 °C y 900 °C respectivamente, lo cual puede estar relacionado con su composición química y de fase.
- El índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adición del 30 % de arcilla calcinada en sustitución de cemento a los 7 y 28 días de curado, es superior a 75 %, que es el mínimo requerido para que el material pueda ser utilizado como aditivo puzolánico, sin afectar en exceso la resistencia del mortero.
- La utilización de la arcilla calcinada como material puzolánico puede disminuir el consumo energético y las emisiones nocivas al medio ambiente en comparación con la producción de cemento Pórtland a partir del clínker.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Los productos de la calcinación, de las arcillas multicomponentes de la región de Cayo Guam, mostraron sus potencialidades para su aprovechamiento como material cementicio suplementario.
- El material arcilloso calcinado a 600 °C fue el que mostró mejor reactividad puzolánica en los morteros, seguido del calcinado a 750 °C y 900 °C. Lo que demuestra, que con el aumento de la temperatura, disminuye la resistencia mecánica de los morteros tanto para los 7 como para los 28 días de curado.
- El índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adición del 30 % de arcilla calcinada en sustitución de cemento, a los 7 y 28 días de curado, es superior a 75 %, que es el mínimo requerido para que el material pueda ser utilizado como aditivo puzolánico.
- Con las sustituciones parciales del cemento Pórtland por materiales puzolánicos a partir de las arcillas calcinadas, se logra reducir el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono en las industrias cementeras.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

- Estudiar el mecanismo de las reacciones puzolánicas a partir de la caracterización del material natural y los productos de la calcinación.
- Determinar la influencia del tiempo de calcinación, la granulometría y el porcentaje de sustitución del material arcilloso en la resistencia mecánica de los morteros.
- Ampliar el estudio en pastas y hormigones.
- Determinar las condiciones de calcinación óptimas para la obtención de un material de alta reactividad.
- Realizar el estudio para la determinación de los consumos energéticos de la producción de puzolana a partir de arcilla calcinada.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- AITCIN, P. C. 2000: Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research. 30p.
- ALUJAS, D. A. 2010: Obtención de un material pozzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Rafael Quintana Puchol (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 106p.
- ASTM C – 311, 2008: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete.
- ASTM C 897- 00, 2009: Standard specification for aggregate for job-mixed portland cement-based plasters.
- CAMPOLAT, F.; YILMAZ, K.; KÖSE, M.; SÜMER, M y YUURDUSEV, A. 2003: Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. Cements and Concrete Research. 1 - 6.
- CASTILLO, R. 2010: Aporte de las arcillas calcinadas a la mejora de la durabilidad de hormigones. Revista Ingeniería de Construcción.
- DE OLIVEIRA, M. P. Y BARBOSA, N. P. 2006. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 10, 490-496.
- ERDOGAN, T. Y. 2002: Materials of construction. Middle East Technical University. Press. Ankara.
- ERDOGDU, K. 1996: Effects of pozzolanic cements of different fineness values and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values. Thesis. Middle East Technical University, Ankara.

- FERNANDEZ, L. R. 2009: Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries, in Faculté Sciences et Techniques de L'Ingenieur., École Polytechnique Federale de Lausanne. Lausanne. 178p.
- GENER, R. M. 2002: Influencia de la relación agua/cemento en la elaboración del mortero normalizado de los cementos con puzolana. *Materiales de Construcción*, ISSN 0465-2746 (265): 77-84.
- GIBBONS, P. A. T. 1997: Pozzolans for lime mortars. *Articles from building conservation. The conservation and repair of Ecclesiastical buildings.*
- HE, CH.; OSBAECK, B.; MAKOVICHY, E. 1995: Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. *Applied Clay Science*. p. 337-354.
- JIMENEZ, M. P.; GARCÍA, M. A. Y MORÁN, C. F. 1982: Hormigón armado. Tomo I. Barcelona, España. Editorial Gustavo Gili S.A. ISBN 84 - 252 – 0758 – 4: 13–18.
- MALHOTRA, V. M. Y MEHTA, P. K. 1996: *Pozzolanic and Cementitious Materials.* Gordon and Breach Publishers, Preface.
- MARTIN-CALLE.1989: Pouzzolanité d'argiles thermiquement activées: Influence de la minéralogie et des conditions de calcination in *Laboratoire matériaux Minéraux.*, INSA: Lyon.
- MARTIRENA, J. F. 2009: Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. 65p.
- MULLER, C. J. 2005: Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics. *Swiss Federal Institute of Technology Zurich.* 159 p.
- NC 173 - 2002: Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.
- NC TS 527 - 2007: Cemento hidráulico. Método de ensayo. Evaluación de las puzolanas.
- OROZCO, G. 1995: Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico. ISMM.

- POUNDS, T. M. 2009: Abatement in Cement and Concrete 1990-2050, U.S. Environmental Protection Agency. Resource Conservation Challenge Workshop, Washington, D.C.
- QUINTANA, C. E. 2005: Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Emilio R. Redolfi (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 308 p.
- RIVERA, N. 2009: Influencia del metacaolín en la cinética de hidratación en pastas de cemento. Geociencias. La Habana, Cuba.
- ROSSEN, J. 2010: Ternary cement blends based on metakaolin and limestone. EPFL. Lausanne. 60 p.
- SABIR, B. B. 2001: Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites. 23p.
- SAMET B. T. 2007: Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. Cement and Concrete Composites. In Press, Corrected Proof.
- SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. 2011: Sustainable cement production-present and future. Cement and Concrete Research 41, 642-650.
- SHVARZMAN, L. A. 2003: The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. Cement and Concrete Research. 33p.
- SOUZA, P. S. L. 2005: Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. Cement and Concrete Research. 35p.
- TAYLOR, H. F. W. 1990: Cement Chemistry. Academic Press: London, U.K. 491.
- TAYLOR, H. F. W., 1967: La química de los cementos, Enciclopedia de la industria química. Ediciones URMO, Bilbao, impreso en España.
- TODOR, D. N. 1976: Thermal Analysis of Minerals. Kent Abacuss Press. 256p.
- VALDEZ, P. L. 2004: Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. Ciencia UANL, VII (002): 190 - 195.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1 Resistencia a la flexotracción y a la compresión de los morteros de referencia, en MPa.

Morteros de referencia (100 % de cemento Pórtland)	Tiempo de Curado	
	7 días	28 días
Flexotracción		
Mortero 1	0,14	0,28
Mortero 2	0,14	0,28
Mortero 3	0,14	0,28
Promedio	0,14	0,28
Compresión		
Mortero 1	3,40	5,25
Mortero 2	3,40	5
Mortero 3	3,20	4,88
Mortero 4	3,60	5,35
Mortero 5	3,80	5,75
Mortero 6	3,50	5,88
Promedio	3,48	5,35

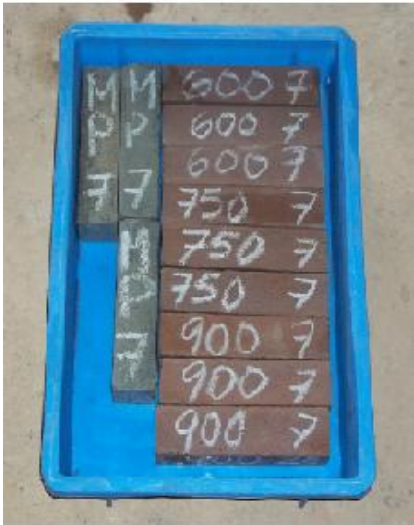
Anexo 2 Resistencia a la flexotracción y a la compresión de los morteros con arcilla calcinada a 600, 750 y 900 °C, en MPa.

Flexotracción	Tiempo de Curado	
	7 días	28 días
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 600 °C		
Mortero 1	0,33	0,61
Mortero 2	0,33	0,56
Mortero 3	0,33	0,56
Promedio	0,33	0,58
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 750 °C		
Mortero 1	0,28	0,51
Mortero 2	0,28	0,51
Mortero 3	0,33	0,47
Promedio	0,30	0,50
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 900 °C		
Mortero 1	0,19	0,19
Mortero 2	0,19	0,23
Mortero 3	0,19	0,22
Promedio	0,19	0,21

Anexo 3. Resistencia a la compresión de los morteros con arcilla calcinada a 600, 750 y 900 °C, en MPa.

Compresión	Tiempo de Curado	
	7 días	28 días
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 600 °C		
Mortero 1	7,50	13,63
Mortero 2	7,75	14,88
Mortero 3	7,75	13,85
Mortero 4	7,63	13,13
Mortero 5	7,50	14,25
Mortero 6	7,38	14,10
Promedio	7,58	13,97
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 750 °C		
Mortero 1	5,63	12,38
Mortero 2	6,13	12,25
Mortero 3	6,25	12,45
Mortero 4	6,13	12,88
Mortero 5	6,13	13,30
Mortero 6	6,13	14,00
Promedio	6,06	12,88
Morteros con 30 % de arcilla calcinada a 900 °C		
Mortero 1	3,63	9,38
Mortero 2	3,75	11,00
Mortero 3	4,00	10,00
Mortero 4	3,75	10,38
Mortero 5	3,75	9,38
Mortero 6	3,88	10,05
Promedio	3,79	10,03

Anexo 4 Probetas de morteros patrones y con adición de 30 % de arcilla calcinada.



7 días



28 días