

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Facultad de Construcciones.

Departamento de Ingeniería Civil.



TESIS DE GRADO

***Titulo: Proyecto de norma cubana para la
utilización de arcillas calcinadas como material
cementicio suplementario basadas en la
modificación de las NC 527:2013 y NC 528:2013***

AUTORA: Annety Rivero Estopiñales

TUTOR: Ing. Dayran Rocha Francisco

Santa Clara 2016

Pensamiento

“El punto de vista de la vida, de la vida práctica, debe ser el punto de vista primero y fundamental de la teoría del conocimiento”

Vladimir Ilich Lenin

Dedicatoria

A mis padres Blas Alberto y Yalaxis que me han dado todo su esfuerzo y amor, que me han dado su vida entera.

A mi hermano, el hombre en que me he apoyado cuando lo he necesitado y por el cual luché por ser un ejemplo a seguir.

A mis amigos, por todos estos años recorridos.

A todos los que de una manera u otra han participado en la elaboración de este, mi esfuerzo, mi logro.

Agradecimientos

Le agradezco a mi tutor por el tiempo y dedicación, por los momentos de desesperación, de paciencia, de regaños y alegrías.

A todos los profesores que en el transcurso de estos años me brindaron su conocimiento, tiempo y dedicación.

A todos mis amigos, los que se han quedado y los que se han ido porque de una manera u otra han estado presentes cuando los he necesitado, porque no es un adiós para siempre es un adiós por el momento.

A mis padres por todos estos años de espera y dedicación.

A mi hermano, a mi novio y a toda mi familia por apoyarme y ayudarme con todos mis sueños.

A mis michís, Lilli y Amy, gracias por estos años.

Resumen.

Hoy en día, la práctica de distribuir puzolanas como un material o una opción más a utilizar en la producción de cementos, morteros y hormigones se hacen frecuentes en muchos países, en Cuba se han estado acometiendo importantes acciones referentes a la investigación y desarrollo de varios materiales; por lo que El Centro de Investigación y Desarrollo de Estructura y Materiales (CIDEM) junto con el Instituto Politécnico Federal de Lausana, Suiza realizan en nuestro país grandes estudios donde se ha demostrado científicamente, la efectividad de las arcillas caoliníticas cubanas activadas mediante la calcinación combinadas con el carbonato de calcio en forma de piedra caliza, como material cementicio suplementario (MCS).

Debido a que nuestro país no cuenta una experiencia de producción industrial sostenida de cemento con este tipo de adiciones, se han estudiado diferentes yacimientos arcillosos a nivel nacional con potencialidades para su uso con este fin.

Este trabajo desarrolla propuestas de normas cubanas de especificaciones y métodos de ensayo, basadas en la modificación de las normas ya existentes, incorporando a éstas las especificaciones técnicas necesarias y la experiencia de más de cinco años de investigación en el desarrollo de cementos con adiciones puzolánicas, teniendo como base el uso de arcillas calcinas y calizas. De esta manera será posible producir un cemento con una resistencia muy superior a la penetración de agentes como cloruros que pueden producir daños en la matriz del hormigón, además de la enorme importancia que tiene el uso extensivo de las puzolanas en la producción de los cementos para reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Palabras claves: cemento, puzolana, arcilla calcinada, norma

Abstract.

Nowadays, the practice to distribute pozzolanas like a material or an option plus to utilizing in the production of cements, mortars and concretes do themselves frequent at many countries, in Cuba they have been undertaking important referent actions to the research and development of several materials; What The Research Center and Estructura's Desarrollo and Materiales (CIDEM) along with Lausana's Polytechnic Federal Institute, Switzerland accomplish at country big studies where it has been demonstrated scientifically for, the effectiveness of clays caoliníticas Cubans activated by means of the calcination combined with the calcium carbonate in the shape of limestone, like material supplementary cementicio (MCS).

Because our country does not tell an experience of industrial production held of cement with this type of additions, they have studied different clayey deposits nationally with potentialities for his use to this end.

This work develops proposals of standards Cubans of specifications and methods of essay, based in the modification of the right now existent standards, incorporating the technical necessary specifications to these and the experience of over five fact-finding years in the development of cements with additions puzolánicas, having like base the use of clays concretes and limestones. This way it will be possible to produce a cement with a very superior resistance to agents' penetration like chlorides that damages in the womb of concrete, in addition to the enormous importance that the extensive use of the pozzolanas in the production of it has cements to reduce the energetic consumption and the emissions of CO₂ to ambient midway can produce.

Keywords: Cement, pozzolana, clay reduced to ashes, standard

Índice.

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Keywords: Cement, pozzolana, clay reduced to ashes, standard.....	5
Introducción.....	9
Capítulo 1: Fundamentos teóricos y metodológicos sobre la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de las arcillas como material puzolánico. .	17
1.1 Historia y desarrollo del cemento Pórtland	17
1.1.1 Métodos más utilizados para la producción de cemento.....	18
1.1.2 Propiedades del cemento Pórtland.....	19
1.1.3 Almacenamiento del cemento Pórtland	20
1.1.4 Clínquer de cemento Pórtland. Características.	21
1.1.5 Desarrollo de la industria cubana del cemento a partir del año 1959.....	22
1.2 Cementos mezclados o con adiciones.	23
1.2.1 Materiales Cementicios suplementarios más usados en la actualidad.....	23
1.2.2 Producción de Cementos mezclados o con adiciones en Cuba.....	25
1.3 Cementos ternarios. Características.....	27
1.4 Definición de puzolanas	28
1.4.1 Tipos de puzolanas	29
1.5 Utilización de arcillas calcinadas como MCS.....	31
1.5.1 Calcinación de las arcillas. Características.....	32
1.5.2 Yacimientos existentes en Cuba	33
1.6 Análisis de la base normativa a nivel internacional.....	34
1.6.1 La normalización.	34
1.6.2 Evolución de las normas para la fabricación de cemento.	34
1.6.3 Necesidad de una normalización internacional de cementos.....	35
1.6.4 Organismos internacionales de normalización.	36
1.6.4.1 ISO (Organización Internacional de Normalización).....	36
1.6.4.2 ASTM	36
1.6.4.3 CEN (Comité Europeo de Normalización).....	37
1.6.4.4 Otros Organismos Internacionales de Normalización.....	38
1.7 Historia de la normativa de cementos a nivel nacional.	38

1.8 Conclusiones parciales del capítulo I.....	41
Capítulo 2: Fundamentación de los parámetros técnicos a incluir en el proceso de normalización para la puesta en práctica de las arcillas calcinadas como material cementicio suplementario	43
2.1 Introducción.....	43
2.2 Análisis de la NC 527:2013 y de la NC 528:2013	43
2.2.1 Cambios en la NC 527:2013	43
2.2.2 Cambios en la NC 528:2013	43
2.3 Descripción de los yacimientos arcillosos estudiados en Cuba	45
2.3.1 Tablas resúmenes de las diferentes características de los yacimientos	50
2.4 Propuesta de modificación de la NC 527:2013 y de la NC 528:2013.....	52
2.4.1 Clasificación de las arcillas utilizadas como fuente de materias primas para la obtención de materiales puzolánicos.....	52
2.4.2 Métodos de evaluación de la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas.....	56
2.5 Conclusiones parciales del capítulo II.....	58
Conclusiones.....	61
Recomendaciones.....	62
Bibliografía.....	64
Referencias Bibliográficas.....	65

Introducción.

Introducción.

La investigación y desarrollo de nuevas fuentes alternativas de materiales cementantes constituye uno de los aspectos de mayor interés en el campo de los materiales de construcción. Las consecuencias de los combustibles fósiles empleados en la fabricación del cemento constituyen un impacto de grandes volúmenes de emisiones de CO₂ al medio ambiente junto al elevado costo de dicho proceso lo que trae consigo afectaciones en la economía y en la sustentabilidad ambiental presentándose entonces como uno de los problemas a resolver para mejorar las diferentes afectaciones de la actividad humana.

Hoy en día, el cemento es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo produciéndose alrededor de 150 países. Su uso universal, la posibilidad de producción industrial, su gran versatilidad y los grandes resultados obtenidos en su utilización hacen que su expansión y su contribución al desarrollo de la humanidad hagan que su nivel de producción nacional se considere representativamente a la del nivel de desarrollo de un país.

Dentro de las cinco industrias que consumen mayor cantidad de energía a nivel mundial podemos encontrar a la industria cementera, responsable del 50% del consumo de la materia primaria y a su vez del 53% del total de emisiones de CO₂. En lo referente a emisiones de gases de efecto invernadero la principal aportación de la industria cementera es la enorme cantidad de CO₂ liberado al medio ambiente. Este viene dado por varios factores como las particularidades de cada proceso productivo, los diferentes combustibles utilizados, la eficiencia energética o el contenido de clínquer en el cemento.

Las medidas a tomar para disminuir las emisiones de CO₂ durante la producción de cemento pueden ser clasificadas en dos grandes grupos, el primero con el aumento de la eficiencia del proceso de producción disminuyendo los consumos de petróleo y el segundo, reduciendo la producción de clínquer, a través de la incorporación de las adiciones minerales durante el proceso productivo o en el momento de la fabricación del hormigón. (Price L., 1999, Vanderley, 2002). La reducción de cualquiera de estas medidas sería muy poca para los futuros planes de producción del cemento; sin

embargo la meta es reemplazar hasta un 50% de combustible fósil, en términos prácticos solo el 15% ha sido alcanzado hasta ahora (Schmidt, 2003). Por otra parte, podemos concluir que las mejorías tecnológicas dependen del nivel económico del país donde la producción tiene lugar, pudiendo apreciar que el uso de las adiciones minerales ha llegado solo a un 22% de reducción de las emisiones.

Durante 2007 fueron producidos alrededor de 2600 millones de toneladas de cemento pórtland en todo el mundo. China destaca sobre todos los países como principal productor, con casi el 50% de esta producción mundial (unos 1300 millones de toneladas), lo que da una idea del proceso de expansión que está viviendo este país. Le siguen muy de lejos la India (160 millones de toneladas) y Estados Unidos (96 millones de toneladas). España produjo durante este año unos 50 millones de toneladas, mientras que los primeros productores dentro de los países de América Latina son México y Brasil, con aproximadamente 40 millones de toneladas cada uno. (González, 2009)

Actualmente la producción anual del sector de cemento en Cuba evidencia una capacidad productiva montada en un 2.8 MMt de clínker de la cual se realiza una utilización del 40%, produciéndose por vía seca a pesar de los altos niveles de consumo. Esta producción comparada con la realizada en el 2014 (de 1.8 MMt) es mayor lo que significa un aumento de la necesidad de inversión del sector para incrementar la capacidad productiva y su uso, por lo tanto consideramos la inversión como la solución para la nueva tecnología, de ahí que se calcule una posible demanda con un crecimiento del 18% en los próximos años, por lo que el país trata de adentrarse en esta nueva creciente de la actividad constructiva, poniendo en práctica la máxima producción de cementos puzolánicos debido al crecimiento de este en tan corto plazo pues las nuevas inversiones, que serían ideal, tardarían algunos años.

Como país en vías de desarrollo, Cuba presenta una elevada demanda para satisfacer sus necesidades constructivas. Así que estudios en conjunto con el Instituto Politécnico Federal de Lausana, Suiza y el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) han logrado llevar a cabo la investigación y desarrollo de un nuevo tipo de cemento producido por la sustitución de una parte del clínker, material más

costoso del cemento, por una combinación de arcilla calcinada y piedra caliza como material cementicio suplementario.

La arcilla es un suelo o roca sedimentaria constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito, presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura y junto con la caliza conforman los compuestos del cemento, pues se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclado con agua y también sonoridad y dureza al calentarla a altas temperaturas. Esta pertenece además al grupo de las puzolanas artificiales, que constituye también una materia esencialmente silicosa que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice-alúmina) capaces de fijar el hidróxido de cal a la temperatura ordinaria para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas. En tal sentido, las puzolanas dan propiedades cementantes por lo que el uso de estos como adición mineral activa contribuye a disminuir los costos del producto sin afectar su resistencia mecánica y durabilidad utilizando menos cemento, con lo cual se mejoraría el perfil ecológico de dicho material.

En Cuba existen varios yacimientos de arcillas como en el Yigre, Loma Sur, La Loma, Pontezuela y Cayo Guam. Se trabajó con las arcillas de estos yacimientos donde en los estudios de laboratorio y en la etapa de escalado industrial del material empleado se incluyeron: la caracterización química y mineralógica mediante varias técnicas, así como la caracterización morfológica a través de la determinación de la distribución del tamaño de partículas, además de la evaluación del potencial puzolánico de la arcilla del yacimiento a escala de laboratorio a partir de un proceso de activación térmica por calcinación estacionaria.

Se realizó la reactividad puzolanica de los productos de calcinación de las arcillas, calcinadas a 750 y 850°C y se llevó a cabo de manera adicional un protocolo experimental conocido como Ensayo R3, el cual se basa en medir el calor total liberado por una pasta cal-puzolana, a la cual se le adiciona también álcalis y sulfatos, de manera que se simulan las condiciones que existen en un sistema mezclado cemento-puzolana, pudiendo apreciar que el calor que es liberado en un tiempo determinado es directamente proporcional a la reactividad puzolanica de los productos calcinados. Esta

depende de factores como: la temperatura, el tiempo, el método de enfriamiento, tamaño de los granos.

La implementación de este cemento requiere de la existencia de una norma cubana que contemple los requisitos técnicos, primeramente, del material puzolánico a utilizar en sustitución del clínquer (arcilla calcinada y piedra caliza) para luego insertar en la base normativa el producto final (cemento mezclado base clínquer-caliza-arcilla calcinada) partiendo de la falta de experiencias en nuestro país en el empleo de arcillas calcinadas como MCS así como sus especificaciones para la producción. Se realizó una prueba industrial de producción de este cemento ecológico en nuestro país, se verificó el comportamiento del material y sus productos en condiciones reales, obteniéndose resultados que demuestran la aptitud del nuevo cemento. Actualmente se desarrolla una propuesta de norma cubana para la utilización de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario basados en la modificación de las NC 528:2013 y NC 527:2013 con el fin de presentar un producto de calidad en el mercado, propiciando la fabricación de viviendas en todo el país. Así damos lugar al siguiente problema científico:

Planteamiento y definición del problema.

¿Cómo actualizar la normativa cubana vigente relativa al empleo de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario, basado en la modificación de las NC 528:2013 y NC 527:2013?

Objetivo general.

Para el desarrollo de la investigación se consideró el siguiente objetivo general: Definir una propuesta de norma cubana que complemente la base normativa vigente teniendo en cuenta los resultados investigativos del CIDEM en el empleo de arcillas calcinadas, como material cementicio suplementario.

Objetivos específicos.

Para dar cumplimiento al objetivo general anterior se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los fundamentos teóricos y metodológicos sobre la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de cementos mezclados.
- Analizar los parámetros técnicos que debe contener la propuesta de modificación de norma cubana en función de resultados investigativos relativos al empleo de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario en Cuba.
- Desarrollar una propuesta de norma cubana para la utilización de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario basado en la modificación de las NC 528:2013 y NC 527: 2013.
- Proponer la modificación de normas cubanas NC 528:2013 y NC 527: 2013 al Comité Técnico de Normalización No. 22 “Cemento y Cal”.

Tareas de investigación.

- Búsqueda y análisis de información nacional e internacional referente al empleo de arcillas calcinadas en la fabricación de cementos mezclados.
- Revisión de la documentación normativa referida a la utilización de arcillas calcinadas como MCS.
- Análisis de resultados científicos y de la implementación de arcillas calcinadas como MCS en Cuba.
- Comparación de los resultados científicos con los parámetros técnicos de la normativa nacional (NC 528:2013 y NC 527:2013).
- Realización de propuesta de modificación de normas cubanas para la utilización de arcillas calcinadas como MCS en función de resultados de investigaciones científicas realizadas.

Aportes.

Aporte Teórico:

Recopilación de información para la definición conceptual de una normativa que respalde la utilización de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.

Aporte Técnico:

Permitirá una documentación legal que contenga los diferentes parámetros técnicos a cumplir por las arcillas calcinadas como material cementicio suplementario propiciando una mejor eficiencia de los usuarios y del cumplimiento de las exigencias requeridas.

Aporte Social:

Se facilitarán en la convivencia social la producción y empleo de un cemento con menor costo de producción y menores emisiones de CO₂ a la atmósfera, que contenga una normativa necesaria para la producción industrial y faciliten a la vez las relaciones entre productores y usuarios.

Estructura de los capítulos

Primer capítulo: Revisión bibliográfica sobre la evolución que ha tenido la normativa de los cementos en Cuba y el mundo. Análisis de los principales fundamentos teóricos y metodológicos sobre la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de las arcillas.

Segundo capítulo: Se prepara y presenta la estrategia de normalización a seguir para la modificación y aprobación de la propuesta de norma cubana sobre arcilla calcinada como material cementicio suplementario. Se argumentan los diversos parámetros técnicos a través del análisis de los estudios realizados con la arcilla calcinada como material cementicio suplementario. Posteriormente se brindan las conclusiones y recomendaciones del trabajo. Ofreciendo luego la bibliografía utilizada en la realización del trabajo.

Esquema metodológico de la investigación:

- Definición del tema y problema de estudio.
- Recopilación bibliográfica.
- Formación de la base teórica general.
- Definición de objetivos.
- Definición de tareas científicas.
- Capítulo I: Fundamentos teóricos y metodológicos sobre la utilización de la normativa relacionada con la producción y empleo de arcillas.

- Capítulo II: Fundamentación de los parámetros técnicos a incluir en el proceso de normalización para la puesta en práctica de las arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.
- Conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1.

Capítulo 1: Fundamentos teóricos y metodológicos sobre la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de las arcillas como material puzolánico.

1.1 Historia y desarrollo del cemento Pórtland

En la antigua Grecia se comenzó a utilizar por primera vez el cemento con la ayuda de tobas volcánicas, surgiendo de esta manera los primeros cementos naturales, desde la antigüedad para realizar la unión de mampuestos en las edificaciones se emplearon pastas y morteros que eran elaborados con arcillas, cal y yeso. Por otro lado, en la antigua Roma se empezó a utilizar un cemento natural compuesto con cenizas volcánicas que ha resistido la inmersión en aguas marinas por milenios.

En el siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el cemento Pórtland, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Pórtland. En 1845 Isaac Johnson obtiene el prototipo del cemento moderno con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura; dando lugar a que en el siglo XX surja el auge de la industria del cemento, debido a experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran un cemento de calidad homogénea; con la ayuda de la invención del horno rotatorio para calcinación, el molino tubular y los métodos de transportar hormigón fresco ideados por Juergen Heinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907.

El cemento Pórtland ha contribuido sustancialmente al desarrollo económico de la sociedad moderna, su fabricación sustentada en el uso de recursos no renovables ha generado la producción de grandes cantidades de gases de efecto invernadero. La producción mundial de cemento Pórtland ha experimentado un espectacular crecimiento, en el 2000 fue de $1,75 \times 10^9$ toneladas, con un porcentaje de crecimiento anual del 3.5% desde 1970. Estas producciones continuarán incrementándose en los próximos años pudiendo llegar a incrementos entre 120% y el 180% en el 2020.(Price L., 1999, Vanderley, 2002).

Podemos establecer dos tipos básicos de cemento: el primero de origen arcilloso, los cuales se obtienen a partir de arcillas y piedra caliza en una proporción uno a cuatro y para el segundo caso son los de origen puzolánicos, donde la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico, siendo entonces diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad y por lo tanto por sus destinos y usos. En general se trata de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, desde el punto de vista químico, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena, pues una vez obtenido el material muy finamente molido se mezcla con agua y se hidrata y solidifica progresivamente.

Cuba fue el primer país que produjo cemento en América Latina (1895). En 1958 se alcanza un record 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. (Jr, 2013)

Existen una gran variedad de cementos según la materia prima base y los procesos utilizados para producirlos, por lo que el proceso de fabricación del cemento consta de cuatro etapas principales:

1. Extracción y molienda de la materia prima.
2. Homogenización de la materia prima.
3. Producción del clínquer.
4. Molienda del cemento.

1.1.1 Métodos más utilizados para la producción de cemento

En la industria del cemento se siguen básicamente dos métodos de producción, llamados método húmedo y método seco, para preparar y cocer la materia prima, formada generalmente por una mezcla de piedra caliza y arcilla en la proporción aproximada de 4:1. (autores, 2003)

En el **método húmedo** la materia prima se muele con adición de agua hasta formar un lodo que contiene entre 35 y 40 % de agua. Durante la cocción el agua se evapora. La cantidad de energía requerida viene a ser un 100 % mayor que en el método seco. Por razón del proceso, en el método húmedo la cantidad específica de gas de escape es también mayor. No se fabrican hornos nuevos para el método húmedo, salvo para condiciones extremas de la materia prima. Las instalaciones antiguas son reconvertidas en creciente medida al proceso en seco, con el que se ahorra energía.

En el **método seco** la materia prima se tritura al tiempo que se seca, en el método a contracorriente se precalienta en un llamado intercambiador térmico por medio de los gases calientes que salen del horno y se cose normalmente en un horno tubular giratorio a la temperatura de aglomeración requerida de unos 1400°C. Algunas instalaciones modernas poseen capacidades superiores a 5000 t/día, mientras que la capacidad en los hornos húmedos pocas veces supera las 1000 t/día.

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. En el gas desprendido pueden aparecer también compuestos de azufre (generalmente en forma de SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Las emisiones de vapor, de cloro y flúor gaseosos se evitan en el proceso normal por adsorción de los contaminantes en el producto combustible.(autores, 2003)

1.1.2 Propiedades del cemento Pórtland

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión (el material de

construcción con la mayor resistencia por costo unitario), durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción.

Propiedades generales del cemento:

- Buena resistencia al ataque químico.
- Resistencia a temperaturas elevadas. Refractario.
- Resistencia inicial elevada que disminuye con el tiempo. Conversión interna.
- Uso apropiado para bajas temperaturas por ser muy exotérmico.

Algunas de las propiedades de los productos basados en cemento son (autores, 2016b):

- Hidráulica: la reacción de la hidratación entre el cemento y el agua es única: el material fragua y luego se endurece pues la naturaleza hidráulica de la reacción permite que el cemento hidratado se endurezca aún bajo el agua.
- Estéticas: antes de fraguar y endurecer el cemento hidratado presenta un comportamiento plástico, por lo tanto, se puede vaciar en moldes de diferentes formas y figuras para generar arquitecturas estéticamente interesantes, que serían difíciles de lograr con otros materiales de construcción.
- De durabilidad: cuando usamos correctamente (buena práctica de diseño de mezcla de concreto) el cemento el cemento puede formar estructuras con una vida de servicio larga que soporte los cambios climáticos extremos y agresiones de agentes químicos.
- Acústicas: utilizados con un diseño adecuado los materiales basados en cemento pueden servir para un excelente aislamiento acústico.

1.1.3 Almacenamiento del cemento Pórtland

Es de vital importancia tomar las precauciones necesarias para mantener sus propiedades pues este es una sustancia muy sensible a la acción del agua y de la humedad: luego de recibir el cemento en los diferentes lugares de la construcción, si este es a granel debe almacenarse en depósitos secos que estén diseñados a prueba de agua con gran ventilación e instalaciones apropiadas para evitar la absorción de la

humedad. En otro caso tenemos que el material venga en sacos, pues de ser así se debe almacenar en parrillas de madera o piso de tablas, teniendo en cuenta que no se apilara en hileras superpuestas de más de 14 sacos de altura para almacenamiento de 30 días, ni de más de siete sacos de altura para almacenamiento hasta de dos meses. Después de llegado y almacenado el cemento a las obras se deberá utilizar en el mismo orden cronológico de llegada pues de esta manera evitamos que envejezca indebidamente, no se debe utilizar luego de dos meses ya que no se ha demostrado si está en condiciones satisfactorias.

1.1.4 Clínquer de cemento Pórtland. Características.

El clínquer es el principal componente del cemento Pórtland, el cemento más común y por tanto del hormigón, cuando hablamos de los componentes básicos del clínquer vemos que este se forma tras la calcinación de arcilla y caliza a una temperatura que se encuentra entre 1350 y 1450°C, además de ser el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Pórtland, por lo que contiene cuatro compuestos principales que totalizan el 90% o más del peso del cemento Pórtland, ellos son:

- 40-60% de silicato tricalcico
- 20-30% silicato bicalcico
- 7-14% aluminato tricalcico
- 5-12% ferritoaluminato tetracalcico

Estos mismos cuatro compuestos principales lo contienen cada tipo de cemento, pero en diferentes proporciones, concluyendo que el cemento Pórtland se obtiene tras la mezcla de clínquer, yeso (u otro retardante de fraguado) y aquellas adiciones y aditivos que se dosifican según el uso que vaya a tener.

La clasificación del cemento puede hacerse en función de:

- La naturaleza de sus componentes.
- Su categoría resistente.
- O, en sus casos, por sus características especiales

La evolución y mejoramiento del cemento y su proceso de fabricación ha sido gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, actualmente se comenta que su crecimiento ha ido surgiendo sobre la investigación de las propiedades del mismo y al mismo tiempo ir mejorando las instalaciones técnicas para una mayor sostenibilidad. En relación al producto, la investigación se ha centrado en fomentar las adiciones al cemento para mejorar algunas de sus propiedades y minimizar la huella ambiental de su producción. Además de que el uso de algunos residuos industriales, como materia prima del cemento, es una vía de reciclado de desechos que suponían un grave problema ambiental, permitiendo a la industria ser más eficaces medioambientalmente tanto por la utilización del residuo como por la menor emisión de CO₂ que su uso supone.

1.1.5 Desarrollo de la industria cubana del cemento a partir del año 1959.

La primera fábrica de cemento en Cuba y en Iberoamérica, fue inaugurada en La Habana el 7 de julio de 1895. En 1918, en el municipio del Mariel se inició la producción de cemento en la fábrica llamada El Morro, de propiedad norteamericana, la cual fue nacionalizada en octubre de 1959. El 30 de mayo de 1955, se produce el primer cemento de marca Titán en Santiago de Cuba. El 30 de septiembre de 1960, fue nacionalizada dicha fábrica. El 18 de septiembre de 1957, comenzó a operar la fábrica Santa Teresa de Artemisa, la misma fue nacionalizada el 15 de julio de 1960. Posteriormente, fueron modernizadas las ya existentes y se construyeron tres nuevas fábricas en Nuevitas, Siguaney y Cienfuegos. En el año 1989, se logró una producción por encima de los 3,5 millones de toneladas. A partir del año 1990, la industria cementera comenzó a presentar un deterioro en sus producciones, debido al Período Especial, lo que provocó la necesidad de crear dos corporaciones con capital extranjero en las plantas del Mariel y Cienfuegos. Hacemos énfasis en una de ellas y hablamos un poco de la evolución histórica de la Fábrica de Cemento Siguaney y recordamos unos años atrás donde en 1950: Por primera vez se reporta sobre la existencia en la zona de materias primas aptas para la producción de Cemento Pórtland, en 1962: Se firma por el Ministro de Industrias, Comandante Ernesto Guevara, con la República Socialista de Checoslovaquia un convenio para el montaje en Siguaney de una planta de cemento,

en 1971: Se realiza la puesta en marcha de la primera línea de producción proceso que terminó en agosto de 1972, cuando se puso en marcha la cuarta y última línea, en 2001: La Empresa se integra al Perfeccionamiento Empresarial, en 2008: Se produce el cemento para pozos de petróleo y cemento puzolánico tipo IV A de acuerdo a la norma UNE.(autores, 2016a)

1.2 Cementos mezclados o con adiciones.

La mayoría de las mezclas de hormigón hoy en día contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el hormigón, siendo estos materiales generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, los cuales pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en el hormigón; estas adiciones al cemento a veces son conocidas como adiciones minerales por lo que deben cumplir con los requerimientos establecidos por las normas. Pueden ser utilizados individualmente o en combinación en el hormigón; o sea, ser añadidos a la mezcla de hormigón como un cemento que contenga la adición o como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de concreto premezclado.(autores, 2012). Debe señalarse que las adiciones trabajan de dos formas fundamentales: primeramente, hidratan al cemento Pórtland (caso de las escorias de alto horno) y en segundo lugar podemos apreciar que actúan como puzolanas que proporcionan sílice a la mezcla y reaccionan con la cal hidratada (caso de ceniza volante tipo F)

Como ya conocemos algunos de estos materiales son nombrados puzolanas que por sí sola no tiene ningún poder cementante, pero cuando se utiliza con el cemento Pórtland reacciona para así formar compuestos cementantes; sin embargo, tenemos a otros materiales que como la escoria si presentan propiedades cementantes.

1.2.1 Materiales Cementicios suplementarios más usados en la actualidad

- **Cenizas Volantes:** son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las

partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Para su utilización en el concreto deben tener conformidad con la norma ASTM C618, la característica de este puede variar según la fuente del carbón mineral que se quema.

- **Escorias de alto horno:** son subproductos no metálicos producidos en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce, deben tener conformidad con la norma ASTM C989, estas por si misma tiene propiedades cementantes, pero se incrementan al unirlas con el cemento Pórtland.
- **Humo de Sílice:** material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción del metal silíceo o ferrosilíceo, se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico, polvo extremadamente fino cuya norma es ASTM C1240, debido a su extrema finura deberá garantizarse un procedimiento especial.
- **Puzolanas Naturales:** varios materiales poseen o pueden ser procesados para obtener propiedades puzolánicas, estas en específico tienen un origen volcánico, tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente, deben tener conformidad con la norma ASTM C618. Esta incluye el Metacaolín (producido a partir de arcillas caoliniticas relativamente puras) y las arcillas o esquistos calcinados, estos materiales son producidos mediante la calcinación de minerales de origen natural.

Ante todos estos datos podemos plasmar que las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para el mejoramiento del desempeño del hormigón en su estado fresco y endurecido, además de ser utilizados para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia; pues para satisfacer la producción deseada estos materiales le permiten al productor de hormigón poder diseñar y modificar la mezcla, ya que la mezcla de concreto con grandes contenidos de cemento Pórtland es susceptible a una mayor generación de calor y a la fisuración, de ahí que estos efectos pueden ser controlados con las diferentes adiciones al cemento, por lo que al reducir la cantidad de cemento Pórtland disminuye el consumo de energía y las emisiones asociadas a su producción. (autores, 2012)

Las adiciones minerales de alta finura pueden ayudar al mejoramiento de las cualidades del hormigón. Estos pueden ser efectos físicos tal como el incremento de la compacidad, o efectos físico - químicos como los nuevos productos de reacción formados durante la reacción puzolánica. En ambos casos el efecto final es similar, la porosidad del hormigón disminuye y la distribución y tamaño de los poros se hacen más pequeños. El uso de las puzolanas puede modificar las propiedades Teológicas, mecánicas y la durabilidad del hormigón. (Juan José Dopico, 2008)

Las adiciones minerales ó puzolánicas ejercen una doble función en estos casos. Las finas partículas puzolánicas llenan los espacios vacíos entre los granos de cemento y entre el resto de los granos puzolánicos mejorando la compacidad. Solo una pequeña parte de las adiciones puzolánicas, menos del 20% reacciona. La resistencia a la compresión, sin embargo, no se corresponde con el bajo nivel de hidratación alcanzado, es atribuida a la contribución de la interacción eléctrica entre las partículas más finas de las cenizas volantes.(Lam L., 2000, Qualin Niu, 2003).

El uso de la adición cal - puzolana permite reducir las cantidades de cemento Pórtland usado en los hormigones de alto performance, constituyendo una atractiva propuesta desde el punto de vista medio ambiental.

Actualmente también se mencionan dos tipos de adiciones utilizadas que son: las hidráulicamente activas y las hidráulicamente inactivas donde la reactividad de las mismas define su mayor o menor hidratación, la cual esta fundamentalmente ligada con la condición amorfa de su estructura, sin embargo, su cristalinidad es lo que menos las influencia y caracteriza, pero más las diferencia.

1.2.2 Producción de Cementos mezclados o con adiciones en Cuba

Entre los años 60 y 90 se llevaron a cabo producciones e investigaciones en este sentido, estudiando aditivos, tobas y minerales en cemento y hormigón. Incluso en los años 85-90 se realizaron pruebas industriales con producciones experimentales de cemento PP-35 con adiciones de toba de alrededor de 10 % y elaboración de hormigones en múltiples aplicaciones. Luego vino el Período Especial y hubo un

deterioro en estas actividades, pero en los últimos años la necesidad de reanimación de la industria en el país, unido a la necesidad de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, propiciaron que se desarrollara nuevamente la idea de producir cementos mezclados con un mayor incentivo desde el punto de vista económico. (Nicolas, 2015)

Los cementos mezclados por sus propiedades son muy resistentes a los medios agresivos. El uso de este tipo de materiales también favorece la protección de las construcciones ya que, por ejemplo, desarrollan en su estructura microporos no intercomunicados y por tanto, hacen el hormigón más impermeable. En otras gradaciones, sobre todo cuando tienen mucha adición de toba (que no es el caso de este), como ya existen en Europa, se requiere más agua para lograr una consistencia determinada y con ello pueden dañarse la porosidad y durabilidad de los hormigones en determinadas circunstancias. Por esta razón es muy necesaria la combinación de un clínquer de calidad y aditivos reductores de agua: sería la combinación perfecta para lograr entonces ahorro de energía, disminución de emisiones de CO₂ y hormigones durables. (Nicolas, 2015)

En la actualidad existe una amplia variedad de cementos mezclados. Los materiales inorgánicos que son usados para reducir el consumo de cemento pueden ser mezclados y/o molidos íntimamente con el clínquer y/o mezclados durante la fabricación de este o mezclados durante la fabricación del hormigón o morteros. Las cenizas volantes, escorias granuladas, micro sílice y otras puzolanas naturales o calcinadas son reportados como las adiciones minerales más utilizadas. La naturaleza de los productos formados durante la reacción puzolánica en los cementos mezclados depende de las propiedades de las puzolanas y del clínquer utilizado para confeccionar el hormigón. Los principales productos de reacción son el silicato cálcico hidratado (CSH) y pequeñas cantidades de estringita, hidrogranate y aluminatos hidratados. La relativa proporción de los productos de reacción dependen de las características químicas y mineralogía de las puzolanas usadas. (Day, 1992, Taylor, 1993)

1.3 Cementos ternarios. Características

Los denominados cementos ternarios, son aquellos que se basan en la introducción de dos o más adiciones para obtener mejores propiedades finales. Los efectos sinérgicos de los componentes en estos cementos permiten que cada uno de ellos compensen sus deficiencias mutuas dando lugar a la producción de hormigones amigables con el ambiente, contando con los requerimientos del mercado y sin altos costos de inversión (Nedhi, 2001). Dentro de este tipo de cementos se han estudiado cementos con cenizas volantes y humo de sílice, ceniza volante y escoria siderúrgica, escoria siderúrgica y humo de sílice, ceniza volante y caliza, humo de sílice y caliza, entre otros (Rathan, 2013, Kandasamy, 2014, Vance, 2013, Menéndez G., 2003, Radlinski, 2012, Vegas, 2014). Este tipo de cementos han sido incluidos en algunas normativas latinoamericanas y europeas tales como NBR 11578; IRAM 50000:2000; NMX C414; NTE INEM 490:2011; EN 197.

Un ejemplo de cemento ternario es aquel que incorpora adición de caliza (LS) y escoria de alto horno (BFS). Los beneficios del uso de la piedra caliza (LS) como adición son debidos a su comportamiento como relleno (*filler*), (Kakali, 2000), al completar la fracción fina de la curva granulométrica del cemento sin generar incrementos en la demanda de agua, lo que se refleja en un mejor empaquetamiento y un bloqueo de los poros capilares. Esta adición afecta el proceso de hidratación del C_3A dando lugar a la formación de carboaluminatos y retrasando o impidiendo la transformación de etringita a monosulfoaluminatos, sin embargo, acelera el proceso de hidratación del C_3S al constituir sitios de nucleación de cristales de hidróxido de calcio, lo que se traduce en ganancia de la resistencia a edades tempranas (Bonavetti, 2001, Oey, 2013, Ramachandran, 1986, Vance, 2013). De otra parte, su uso contribuye a la mayor susceptibilidad al ataque por sulfatos de la mezcla cementicia, especialmente por la formación de taumasita, siendo este efecto dependiente del porcentaje de LS incorporado (Moir, 1997, Hartshorn, 1999, Hartshorn, 2001, Irassar, 2009, Irassar, 2010).

En general, a edad de curado de 28 días y superiores, todos los cementos ternarios evaluados superan la resistencia del cemento sin adición. A edades largas (dos años) de curado bajo agua los incrementos resistentes son hasta de un 25%, en especial en las que presentan un mayor contenido de la escoria BFS (15 y 20%), alcanzando resistencias hasta de 44 MPa. Los cementos ternarios presentan igualmente mayor resistencia mecánica a compresión que el cemento sin adición en presencia de sulfatos. El mejor desempeño en este medio, identificado como una menor expansión y una menor pérdida resistente, corresponde a la mezcla de OPC+5%LS+10%BFS, coincidiendo con la que reportó una mayor resistencia a la penetración de agua por vía capilar. Los productos identificados por DRX y SEM en presencia de este agente agresivo fueron Etringita (E) y yeso (Y). Todas las mezclas ternarias pueden ser consideradas de baja permeabilidad a cloruros y alta resistividad, lo que indica un buen desempeño en presencia de este agente agresivo. Lo anterior, muestra la viabilidad de producir cementos ternarios, siempre y cuando se identifique el aporte de cada material individual y se optimice su proporción en la mezcla para alcanzar una sinergia de propiedades, contribuyendo así a la producción de materiales que aporten a la sostenibilidad ambiental sin afectar las especificaciones técnicas exigidas en los códigos constructivos. (Jherson E. Díaz, 2013)

1.4 Definición de puzolanas

Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer la cal, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano. Es probable que el primer empleo de estos materiales fuera el de servir de agregados para los morteros de cal. La observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y del comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y con materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros, ya como materiales activos, con la cal, en polvo y en seco o en húmedo, para obtener los que han pasado a la historia como cementos y morteros romanos, con base en cal y puzolana, o cal, puzolana y arena, respectivamente.

Tales materiales fueron de la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de Pozzuoli, localidad que ha legado el nombre genérico de puzolanas para éstos y para similares materiales en lo sucesivo. De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como inestimables reliquias de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y las más diversas estructuras que han perdurado. Y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario, cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad. (Salazar, 2002)

Por tanto, concluimos que las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina, no son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente, mezcladas con cal y en presencia de agua, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales como el cemento. Estas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento Pórtland sin reducir significativamente la resistencia del hormigón, pues comparado con la producción y empleo de este, estos materiales contribuyen a ahorrar costos y energías, ayudan a reducir la contaminación ambiental y en gran parte mejoran la calidad del producto final.

1.4.1 Tipos de puzolanas

Existen dos tipos de puzolana llamadas: puzolanas naturales y artificiales. Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes, mientras que las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado, escoria de altos hornos granulada y molida y ceniza de cascara de arroz. Estas también pueden clasificarse como puzolanas de clase N, de clase F y de clase C. Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín.

Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Pórtland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Pórtland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Bai, 2003, Al-Akhras, 2006, Justice, 2005, Talero, 2005, Sabir, 2001, Gonçalves, 2009).

El inconveniente del uso de metacaolín se centra en la necesidad de arcillas puras en mineral caolín para su producción y los altos costos energéticos asociados a este proceso. Formas viables de disminuir estas desventajas serían el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza, unido a un eficiente proceso energético de producción durante su calcinación. Empleando como materia prima un suelo arcilloso de bajo grado de pureza de mineral caolín y con la ayuda de trabajos anteriores (Lara, 2010) se demostró como las arcillas calcinadas provenientes de este suelo arcilloso poseían muy buenas propiedades puzolánicas, cuando eran empleadas como materiales sustituyentes del cemento Pórtland ordinario en pastas y morteros.

El tiempo de calcinación influye en la reactividad de la puzolana. Parece indicar que largos tiempos de exposición a altas temperaturas, por encima de la “deshidroxilación”, facilitan la re-cristalización, y con ello la disminución de esta cualidad. La baja reactividad de la puzolana puede ser propiciada por la combinación de temperaturas muy altas y largos tiempos de calcinación. Las temperaturas óptimas de calcinación de manera general están entre 700°C y 900° C, y el tiempo de residencia debe ser menor de 2 horas. (Hernández, 2009)

La norma UNE-EN 197-1:2000 recoge la composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Dentro de los cementos Pórtland con puzolanas, se encuentran los elaborados cementos tipo CEM II/A-Q y CEM II/B-Q con puzolanas naturales calcinadas. Estas puzolanas pueden ser materiales de diferentes orígenes activadas por tratamiento térmico, la influencia de la temperatura de curado en la cinética de reacción y microporosidad de las pastas de cemento con metacaolín

(MK) obtenidas de la calcinación controlada de la caolinita presenta resultados experimentales que muestran el buen comportamiento científico y técnico (microporosidad) de las pastas de cemento elaboradas con MK, no detentándose posibles indicios de inestabilidad de volumen de las fases hidratadas formadas durante la reacción puzolanica. (Frías, 2008)

1.5 Utilización de arcillas calcinadas como MCS

Actualmente son bien conocidas las ventajas económicas y medioambientales de la sustitución del clínquer de cemento por otros materiales cementicios suplementarios. Las arcillas calcinadas en forma de metacaolín han recibido por ejemplo especial atención en años recientes. Se conoce que estas adiciones cuando se añaden a morteros y hormigones mejoran tanto su resistencia mecánica como su durabilidad.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- ✚ Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a dos μm).
- ✚ Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a dos μm .
- ✚ Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Los minerales arcillosos son formados por la variación progresiva de las rocas volcánicas, estas a su vez en estado natural presentan muy baja reactividad. La

estructura cristalina puede ser alterada o destruida por medio de un tratamiento térmico a temperaturas entre 700- 900° C, dando lugar a una puzolana muy reactiva (Liang L.H, 2000).

1.5.1 Calcinación de las arcillas. Características

La temperatura de calcinación de las arcillas influye en las propiedades puzolánicas del material resultante. La mayor reactividad se alcanza cuando el proceso de calcinación provoca la deshidroxilación, dejando como resultado una estructura de arcilla colapsada y desordenada. La temperatura óptima de activación parece depender de la pureza del material y sus minerales acompañantes. Algunos autores han revisado ampliamente este parámetro en estudios anteriores, resumiendo que la temperatura de activación óptima para el caso del caolín se encuentra en el rango de 630-800°C (Fernández, 2009, Sabir, 2001)

Las arcillas, de comprobadas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas, representan, por su amplia disponibilidad y relativa facilidad de tratamiento, una atractiva fuente de puzolanas en regiones donde otros recursos no están disponibles. La mayor parte de los estudios publicados sobre el empleo de arcillas calcinadas como materiales puzolánicos parten del uso de minerales arcillosos con una alta pureza, sin embargo, las arcillas se presentan comúnmente en la naturaleza como depósitos donde se combinan varios tipos de minerales arcillosos con diversos minerales acompañantes y no como fases arcillosas puras, factores que afectan su potencial uso como materiales puzolánicos. (Alujas, 2010)

Los altos costos tecnológicos de producción se evidencian en los dos tipos de calcinación que son empleadas industrialmente para obtener metacaolín (Taylor, 1990). Primeramente, la calcinación lenta donde la deshidroxilación es completa y alcanza una temperatura suficientemente alta durante 5 horas de cocción; tenemos también la calcinación instantánea donde la deshidroxilación puede ser incompleta ya que los tiempos de exposición pueden ser muy cortos.

Después de calcinada la arcilla se observa mediante DRX la presencia de las fases: magnesio-hornblenda, diopsidio, albita, moscovita y cuarzo, materiales cerámicos de elevada dureza que por poseer puntos de fusión muy elevados conservaron su estructura cristalina y presentan propiedades adecuadas para ser empleados como refuerzos de materiales compuestos de matriz metálica. (Pino Rivero, 2009)

1.5.2 Yacimientos existentes en Cuba

En Cuba no existen considerables reservas de arcillas caoliníticas de alta pureza, sin embargo existe en el territorio nacional yacimientos de arcillas con contenidos moderados y bajos de caolinita con la presencia de otros minerales arcillosos potencialmente activos, ejemplo de esto son los seis yacimientos arcillosos estudiados de los cuales se obtuvieron grandes resultados, ellos son: Carranchola-La Moza (MG) ubicado en Manicaragua provincia de Villa Clara, se encuentran arcillas arenosas empleadas en la fabricación de ladrillos; Pontezuela (PZ) ubicado en la provincia de Camagüey en la cual podemos encontrar principalmente caolín blanco y arcillas coloreadas; Sectores La Loma (LL) y Loma Sur (LS) se localizan en la ciudad de Ciego de Ávila la mineralización caolinítica detectada presenta una gran variedad de características dentro de las cuales se destaca una variación de coloración del color blanco, Cayo Guam (CG) se localiza en la provincia de Holguín, la génesis de este yacimiento está determinada por la alteración de los feldespatos producto de la meteorización de los gabroides, El Yigre (YG) se encuentra por el norte de los municipios de Yaguajay y Chambas la arcilla es el componente principal de este depósito, destacándose dos tipos: las de color gris a verdoso y las de color amarillo ocre a pardo rojizo, Castaño (CT) ubicado por la Cuenca de Cabaiguán está compuesta por numerosas formaciones sedimentaria desde el Cretácico hasta el Cuaternario.

La respuesta viene en forma de una cooperación a largo plazo realizada entre la Universidad Politécnica de Lausana en Suiza y la Universidad Central de Las Villas en Cuba, pues una combinación única entre investigación fundamental y aplicación directa en la práctica ha demostrado que las arcillas caoliníticas de bajo grado, de amplia abundancia, podrían ser utilizadas como un material alternativo de bajo carbono. Los

resultados iniciales de las pruebas industriales realizados en Cuba han sido confirmados por un proyecto más amplio que involucra a un grupo de organizaciones académicas y de desarrollo en la India. El cemento de arcilla calcinada y caliza permite reducir entre un 20-30% de las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento tradicional; una gran reducción si se considera que el cemento es responsable del 5-8% de las emisiones producidas por la actividad humana. (José Fernando Martirena Hernández, 2015)

1.6 Análisis de la base normativa a nivel internacional

1.6.1 La normalización.

La Organización Internacional de Normalización, ISO, ha definido la normalización como: El proceso de formular y aplicar reglas con el propósito de establecer un orden en una actividad específica, para beneficio y con la colaboración de todos los interesados y en particular, para la obtención de una economía óptima de conjunto, respetando las exigencias funcionales y de seguridad. Debe basarse en resultados ciertos, obtenidos por la ciencia, la técnica y la experiencia; debe fijar las bases, no solamente para el presente sino también para el desarrollo futuro y debe estar de acuerdo con el progreso. La elaboración de una norma es una obra de carácter eminentemente colectivo, en la cual deben participar todos los interesados en discusión franca y libre que garantice el consenso general. (autores, 2010a)

1.6.2 Evolución de las normas para la fabricación de cemento.

En los últimos años, las normas para fabricación de cemento han sufrido importantes cambios, con una tendencia a adecuarse a las necesidades de la construcción moderna y a contribuir a la reducción de los gases con efecto invernadero, con especial énfasis en el CO₂. Para establecer los requisitos de los cementos, el INEN emitió la NTE INEN 152, equivalente a la ASTM C150, que cubre los Cementos Portland Puros, Tipos I al V (OPC, Cemento Portland Ordinario). Producir estos cementos genera más CO₂ que la fabricación de los cementos actuales, debido a los procesos físico-químicos inherentes en su forma de producirlos. (autores, 2010b)

Luego surge la NTE INEN 490, equivalente a la ASTM – C595, en donde se tienen cementos compuestos con adiciones de puzolana, en otras palabras, una norma contemporánea, con el cemento Tipo IP. Estos cementos, al producirlos, generan menor cantidad de CO₂ y se introducen conceptos de durabilidad en los cementos y hormigones comunes. Finalmente, tenemos la actual norma NTE INEN 2380, equivalente a la ASTM – C1157. A diferencia de las normas anteriores, en donde se establecían límites en la composición química, en esta norma el requisito prioritario es el desempeño de los cementos hidráulicos al ser usados en hormigón. Estos cementos colaboran con el medio ambiente debido a que, entre otras ventajas, su producción genera menos cantidad de CO₂; adicionalmente, su mayor ventaja es que sus usos y aplicaciones van encaminados a los modernos conceptos de durabilidad. (autores, 2010b)

1.6.3 Necesidad de una normalización internacional de cementos.

El cemento fue uno de los primeros materiales de construcción objeto de reglamentación o normalización. Lógicamente, esta normativa comenzó a nivel nacional y las primeras reglas para fijar la calidad del producto se editaron, hace más de un siglo, a nivel interno en las propias fábricas. Estos documentos industriales fueron los que se manejaron más tarde por las Administraciones Públicas para hacer sus Reglamentos o Pliegos de Condiciones, en primera fase, y por los Organismos Nacionales de Normalización después, para hacer las Normas. Así surgieron, a lo largo de este siglo, las Normas DIN, BS, AFNOR, ASTM, entre otras.

La iniciativa de las fábricas respondía a una necesidad de crearse una imagen de "marca de calidad", al tratarse de un producto nacido del tratamiento, más o menos empírico, de rocas y tierras, en estado natural primero (cementos naturales) y por mezclas convenientemente dosificadas después (cementos artificiales) y conseguido en Empresas reducidas, casi de ámbito familiar, pero en franca expansión a raíz del descubrimiento del cemento Pórtland artificial.

1.6.4 Organismos internacionales de normalización.

1.6.4.1 ISO (Organización Internacional de Normalización)

En 1946, justamente recién acabada la II Guerra Mundial, se crea en Londres la ISO, con la colaboración de 25 países. Su objetivo principal es promocionar la normalización mundial para facilitar los intercambios de mercancías y servicios entre países, a la vez que intentar conseguir un entendimiento mutuo en el campo intelectual, científico, técnico y económico. Actualmente reside en Ginebra y está formada por 71 Comités Miembros Nacionales a través de su Organismo Nacional de Normalización y por 16 Miembros Correspondientes. Estos últimos suelen ser Organismos de la Administración de países en vías de desarrollo que no tienen todavía su propio Organismo o Instituto de Normalización. España está representada en ISO desde 1951 a través de su Instituto de Racionalización y Normalización. (Santamaría, 1982)

Sus actividades se desarrollan a través de Comités Técnicos, con Subcomités y Grupos de Trabajo que se ocupan de los distintos aspectos encomendados a cada Comité. Las normas ISO no tienen carácter obligatorio y van destinadas a los Organismos Nacionales, que las emplean como base para la elaboración de su propia normativa. En 1969, la Comunidad Económica Europea emitió una directriz tratando de suprimir las barreras al comercio de productos entre los Estados miembros. Entre estos productos se encontraba el cemento. (Santamaría, 1982)

La industria cementera consideró que, aunque no existían barreras propiamente dichas en su caso, sería positivo, para facilitar los intercambios, unificar y armonizar los métodos de ensayo, la definición y nomenclatura de cementos y, finalmente, los procedimientos de control de calidad y de conformidad a normas.

1.6.4.2 ASTM

La Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales o ASTM es una organización reconocida a nivel internacional que desarrolla estándares para una gran variedad de categorías; su libro anual de normas ASTM delinea las normas para miles de materiales, incluidos aquellos que son utilizados en la construcción.

Fue fundada el 16 de mayo por iniciativa de Charles Benjamin Dudley y desde su establecimiento en 1898 la ASTM internacional es una de las organizaciones de normas más grandes en el mundo, el proceso de creación de normas de ASTM es

abierto y transparente, lo que permite que tanto individuos como gobiernos participen directamente, y como iguales, en una decisión consensual global. Treinta y cinco mil miembros de ASTM en más de 125 países contribuyen con sus conocimientos técnicos especializados en la construcción.

En los años 1923 al 1930 el desarrollo de la normativización permitió que se ampliara el campo de aplicación de la ASTM y en el curso de la segunda guerra mundial obtuvo un rol importante en la definición de los materiales. En el 2001 la ASTM asume su nombre actual como testimonio del interés supranacional que actualmente han alcanzado las técnicas de normalización.

La ASTM divide a las normas de construcción en categorías, incluyendo juntas de construcción y selladores, cemento, materiales no metálicos resistentes a los productos químicos, cemento y hormigón. Otras normas abarcan temas como los materiales para las carreteras y para la pavimentación, techado e impermeabilización, suelos y rocas, aislamiento térmico, sistema de vehículos y pavimentos, tubería de arcilla vitrificada y madera. (Hare, 2010)

1.6.4.3 CEN (Comité Europeo de Normalización)

El CEN se creó en 1961 y en 1973 comenzó sus tareas el TC-51 "Cementos". Pueden ser miembros del CEN todos los Organismos Nacionales de Normalización de los países miembros de la CEE o de la AELE o susceptibles de serlo. España pertenece desde 1974. Actualmente tiene 17 miembros (toda la Europa Occidental). Sus objetivos se resumen en tres: armonizar las normas establecidas en los países miembros y elaborar una norma europea, apoyar a la normalización mundial en el seno de la ISO, prever los servicios de certificación sobre la base de normas europeas. (Santamaría, 1982)

Lo mismo que en la ISO, sus actividades se desarrollan a través de Comités, Subcomités y Grupos de Trabajo. A diferencia de la ISO, un voto positivo en el CEN significa el compromiso de otorgar la categoría de norma nacional al documento aceptado, dentro de un plazo que podía ser de hasta dos años, es decir, la obligación de publicarlo como Norma Nacional. Por el contrario, un voto negativo o una abstención, supone libertad absoluta para decidir entre su publicación o la

conservación de cualquier norma nacional. También sería posible que si los Ministros de la Comunidad lo aprueban como Directriz sea obligatoria su aceptación, con voto positivo o negativo. (Santamaría, 1982)

En los años que lleva funcionando esta Comisión se han producido documentos muy completos en los primeros grupos. La tarea es lenta porque hay que tener en cuenta que, en ocasiones, ha sido necesario desarrollar una tarea experimental para definir un nuevo método de ensayo o modificar otro preexistente.

1.6.4.4 Otros Organismos Internacionales de Normalización

A nivel internacional existen otros Organismos cuyo ámbito se restringe a ciertas áreas o zonas de la Tierra, como ocurre con el CEN. Por tanto, encontramos la COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas), fundada en 1961, con 15 miembros titulares, entre los que se encuentran Estados Unidos, México y la mayor parte de los países sudamericanos. Todos ellos están representados a través de sus respectivos Institutos de Normalización. También, en 1966 se fundó la ASAC (Comité Consultivo de Normas Asiáticas), que engloba prácticamente a todos los países asiáticos, incluyendo Australia. Luego en 1967 se creó la ASMO (Organización Árabe de Normalización y Metrología), cuyos miembros son la mayoría de los países árabes del Próximo Oriente. El objetivo o la política de todos ellos es hacer el mayor uso posible de las normas ISO (de la que suelen ser miembros), con las modificaciones o adiciones estrictamente necesarias para que respondan a las necesidades de sus respectivas Comunidades. Como resumen, se concluye que el gran Organismo Internacional es la ISO que, con la colaboración de unos 2.000 Organismos Técnicos y más de 100.000 especialistas del mundo entero, ha publicado ya unas 5.000 normas, en sus tres lenguas oficiales (inglés, francés y ruso). (Santamaría, 1982)

1.7 Historia de la normativa de cementos a nivel nacional.

El Instituto Nacional de Racionalización y Normalización se creó en 1949, bajo la denominación de Instituto de Racionalización del Trabajo. En él se crean muy pronto dos Comisiones relacionadas con el tema de cementos: la CT-7 "Ensayo de Materiales"

y la CT-41 "Construcción". En la primera se normalizan métodos de ensayo y en la segunda especificaciones. Con anterioridad a 1960 se publicaron tres normas de ensayo basadas en la NELC (Normas de Ensayo Laboratorio Central) y en la ASTM (concretamente, R.I. en cementos puzolánicos, calor de hidratación y medida de la superficie específica por permeabilímetro Blaine). (Santamaría, 1982)

Entre 1963 y 1966 se publicaron siete normas de Ensayos y once de Nomenclatura y Definiciones, basadas en el PCCH-61 y 64. Desde entonces no se volvieron a publicar más normas sobre cementos en IRANOR. En 1977 se crea la Comisión CT-80 "Cementos, cales y yesos", que en abril de 1981 se desglosa en dos por razones de homogeneidad y equiparación a otras Comisiones extranjeras: la CT-80, con la denominación de "Cementos y cales" y la CT-102, con la denominación de "Yeso y productos del yeso". Esto está en consonancia con las correspondientes ISO TC-74 y TC-152. Con la creación de esta nueva Comisión CT-80 se pretende revitalizar, potenciar y actualizar con más rapidez la normativa del sector, independientemente de la actividad de las Comisiones 7 y 41 que se desenvuelven en un campo de actividades mucho más amplio. (Santamaría, 1982)

Hasta la fecha, en estos Grupos, se han preparado cuatro borradores de norma UNE: dos de ensayos químicos, uno de ensayos físicos y otro de ensayos mecánicos. Para su elaboración se han manejado como documentos de base los correspondientes aprobados en voto preliminar en la TC-51 del CEN (Comité Europeo de Normalización), cumplimentados, en algunos casos, con campañas de ensayos sobre aspectos puntuales que exigían alguna aclaración.

La Oficina Nacional de Normalización, es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones Internacionales y Regionales de Normalización. Esta oficina tiene como objetivo fomentar la eficaz elaboración y el cumplimiento de las normas y otros documentos normativos, así como promover el uso de los mismos para contribuir al aumento de la disciplina tecnológica y la eficiencia de la producción y los servicios, posibilitar la introducción del avance científico-técnico, facilitar el comercio, la protección al consumidor, la salud, la seguridad y el medio ambiente. (Standards, 2001)

Cuando llevamos a cabo la preparación de las muestras se deben aplicar los procedimientos exigidos en varias normas; por ejemplo, para el análisis químico, Instrucciones técnicas normativas elaboradas por LACEMI en 1986, los resultados de control se elaboraran según las normas NC 505:2007, NC 507:2007 entre otras; la NR-MG-5-04 Trabajos Analíticos: Control Geológico de la Calidad y la NRIB-269 Control Interno de la Reproducibilidad de los Resultados de los Análisis Básicos Cuantitativos de materias primas minerales para el área geológica.

Las normas se caracterizan por establecer designaciones, requisitos y clasificaciones que se deben cumplir en los diferentes trabajos de la construcción a la hora de utilizar los cementos, pues esta adecuada preparación que deben adquirir las Normas Cubanas se realiza a través de los Comités Técnicos de Normalización la cual consiste en una competencia basada en evidencias de concenso.

Cuba está forjando las bases para producir un cemento con un bajo contenido de clínquer utilizando arcillas calcinadas como material cementicio suplementario proceso iniciado en la fábrica de cemento de Siguaney con el objetivo de disminuir el costo de energía y las emisiones de CO₂, de esta manera se quiere presentar la propuesta de modificación de la NC: 527 y NC: 528 de 2013, para así, con los datos obtenidos de las pruebas y evidencias recolectadas presentar al Comité Técnico de Normalización del Cemento la propuesta de norma cubana para el uso de la nueva producción.

Con la implementación de este cemento en la industria de la construcción se necesita extender y renovar la normativa existente pues partiendo de la falta de experiencia en nuestro país sobre el empleo de arcillas calcinadas como MCS así como sus especificaciones para la producción y empleo es necesario la información que esta puede brindar para la elaboración de un satisfactorio trabajo. Ejemplo visible de cambios es la realización de una prueba industrial de producción de este cemento ecológico en nuestro país donde se verificó el comportamiento del material y sus productos en condiciones reales, obteniéndose resultados que demuestran la aptitud del nuevo cemento con el fin de presentar un producto de calidad en el mercado, actualmente se desarrolla una propuesta de norma cubana que contemple los

requisitos técnicos del material puzolánico a utilizar en sustitución del clínquer para luego obtener el producto final que sería: cemento mezclado base clínquer-caliza-arcilla calcinada. En la NC 528:2013 rectificaremos parámetros técnicos tales como: composición química y mineralógica pues no es suficiente con la información establecida de un contenido de óxidos mayores que un 70% ya que se necesita un desorden estructural y en la NC 527:2013 veremos los protocolos a utilizar ejemplificando el diagrama ternario y el ensayo R3.

1.8 Conclusiones parciales del capítulo I

- En Cuba existe una norma que incluye el uso de arcillas calcinadas como puzolanas, pero no se tiene la experiencia necesaria en la producción industrial de cementos con este tipo de MCS.
- Consideramos necesario incorporar la información referente al proceso de caracterización y activación de las arcillas para su uso como material puzolánico en las normas de nuestro país.

Capítulo 2.

Capítulo 2: Fundamentación de los parámetros técnicos a incluir en el proceso de normalización para la puesta en práctica de las arcillas calcinadas como material cementicio suplementario

2.1 Introducción

En este capítulo evidenciaremos la información que se propone incorporar en la NC 527:2013 y la NC 528:2013, desde el punto de vista de la composición química-mineralógica hasta la obtención de su reactividad puzolánica caracterizadas por un grupo de parámetros que demuestran la necesidad de un desorden estructural debido a la pérdida de agua asociada a los OH⁻, demostrando que las potencialidades de las arcillas aumenten con el incremento de la relación Al₂O₃/SiO₂ y del contenido de OH⁻ en la estructura (%H₂O (OH⁻)) y de esta manera llevar a cabo el método de evaluación de la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas.

2.2 Análisis de la NC 527:2013 y de la NC 528:2013

2.2.1 Cambios en la NC 527:2013

La NC 527:2013 establece la metodología para la determinación de la reactividad puzolánica de estos materiales mediante ensayos de resistencia mecánicas en morteros normalizados, la información que consideramos necesario introducir en esta norma está dirigida a los procesos de selección y activación de las arcillas calcinadas para su uso como puzolanas.

2.2.2 Cambios en la NC 528:2013

En la NC 528:2013 está incluido el uso de las arcillas calcinadas como puzolanas, determinándolas como puzolanas clase N, a continuación la definición de dicha NC:

Clase N - Puzolanas naturales calcinadas y sin calcinar que cumplen con los requerimientos aplicables dados aquí para esta clase, tales como, algunas tierras de diatomeas, esquistos opalinos, tobas, cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o no;

y varios materiales que requieren calcinación para obtener propiedades satisfactorias, tales como las arcillas y pizarras.(NC528, 2013)

Tabla 1: Requisitos químicos (NC528, 2013)

	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO ₂) + Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) + Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), mín. %	70	70	50
Trióxido de Azufre (SO ₃), máx. %	4	5	5
Contenido de humedad, máx. %	3	3	3
Pérdida por ignición, máx. %	10	6	6

En la tabla 1 se plantea que la sumatoria de los óxidos es mayor e igual que el 70% pero esto no es suficiente pues se necesita un desorden estructural que viene dado por la pérdida de agua asociada a los OH⁻

Además de que el %min de Al₂O₃ tiene que ser ≥ 18% y la relación Al₂O₃/SiO₂ ≥ 0.3

SiO ₂	± 3 %
Al ₂ O ₃	± 2 %
CaO	± 3 %

Tabla 2 — Requisitos físicos (NC528, 2013)

	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida con tamizado húmedo sobre el tamiz 45 μm (No. 325), máx. % a	34	34	34
Índice de actividad de resistencia: b Con cemento Pórtland, 28 días min. % del mortero control	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Requerimiento de agua, máx. % de control	115	105	105

Requisitos de uniformidad			
La densidad y la finura de muestras individuales no podrán variar del promedio establecido para los 10 ensayos precedentes o para todos los ensayos precedentes si el número es menor que 10, por más que:			
Densidad, variación máxima del promedio, %	5	5	5
Retenido en % sobre 45 µm (No. 325), máx. variación, porcentaje de puntos del promedio:	5	5	5

En la tabla de las propiedades físicas analizaremos el parámetro de índice de actividad de resistencia.

2.3 Descripción de los yacimientos arcillosos estudiados en Cuba

a. Yacimiento: Carranchola - La Moza (MG)

Depósito de gran tamaño ubicado al noroeste de la localidad de Manicaragua, provincia de Villa Clara. Este es un yacimiento producto del intemperismo de los granitoides, con arcillas caoliníticas y montmorilloníticas de comportamiento poco hasta muy plástico y arcillas arenosas, color pardo oscuro. En la superficie y entre las capas del yacimiento aparecen capas de arcillas poco plásticas o arenas con alto contenido de cuarzos y feldespatos. En profundidad son arcillas arenosas o granodioritas muy alteradas. Su principal empleo, tanto a nivel industrial como artesanal, es en la producción local de ladrillos.

b. Yacimiento: Pontezuela (PZ)

El yacimiento pontezuela se localiza a 18 km al NE-W de Camagüey y a 3 km aproximadamente al S de la presa Pontezuela. Este yacimiento es de génesis hidrotermal, con una importante variabilidad litológica, formada por tobas y rocas intrusivas básicas (40 %) muy alteradas hidrotermalmente en contacto con las ofiolitas, donde se observa la presencia de caolín y arcillas caoliníticas y montmorillonítica. Se distribuyen en arcillas de coloración rojas – pardas y en ocasiones pardas - oscuras por

la alta presencia de hierro (potencia de 0-15 m), así como también abigarradas, amarillas (potencia de 20 m) y caolín y arcillas caolinitizadas de color gris y blanco (potencia de 2 m). Se observa además presencia de minerales de hierro. Existen dos tipos litológicos fundamentales, caolín blanco y arcillas coloreadas, además de caolín gris, caolín blanco con materia orgánica, caolín blanco contaminado con arcillas rojas. Actualmente se encuentra en explotación para la fabricación de cerámica fina y cerámica roja. Se valora su explotación a escala industrial, para la obtención de cementos con alto grado de sustitución en la Fábrica de Cemento Siguaney.

c. Yacimiento: Sectores La Loma (LL) y Loma Sur (LS)

La región donde se localizan los dos sectores denominados La Loma y Loma Sur, se sitúa a 40 km al SE de la ciudad de Ciego de Ávila, cerca del poblado de Gaspar, situado a unos 6 km al NW del Sector La Loma. En el área afloran las rocas volcánicas, compuestas por vulcanitas de composición ácida-media en la que se destacan cuerpos de diferentes dimensiones de riolita, riodacita, dacita, andesita y sus tobas, afectadas en diferentes puntos por fuertes procesos hidrotermales, con presencia de la facie argílica avanzada y argílica intermedia, predominando la segunda. En la zona se observa un complejo intrusivo gabroplagiogranito; sus exponentes litológicos son plagiogranitos, sienitas, granosienitas, granodioritas, dioritas cuarcíferas y otros, la interacción de las tres primeras características litológicas dan lugar a la formación de los depósitos de caolín en los sectores estudiados, localizados en la zona de contacto de los intrusivos y las vulcanitas en las áreas de debilidad tectónica donde existen zonas de alta permeabilidad, que permitieron el libre flujo de las soluciones hidrotermales durante un cierto período de tiempo efectuando la lixiviación de las rocas encajantes de composición ácida-media produciendo la caolinización de una parte de las mismas.

La mineralización caolinítica detectada presenta las siguientes características:

- La coloración varía del blanco al blanco verdoso claro, blanco grisáceo claro y blanco rosáceo.

- El blanco y blanco grisáceo son de textura talcosa untuoso al tacto, el blanco verdoso claro es de textura arenosa muy fina, también untuoso al tacto. Por último, el blanco rosáceo debe su coloración rosácea a la presencia de Fe_2O_3 en mayor o menor medida ambas texturas están presentes. Al igual que las anteriores es untuoso al tacto.
- Todas las variedades cuando están húmedas son muy plásticas, pesadas. En estado seco son deleznales y de bajo peso.

Sector La Loma: Se localizó un cuerpo central en forma de V con dirección SE-NW de longitud aproximada 500 m y ancho 400 m, Su flanco NE ocupa mayor área, se hunde en esta dirección hacia los pozos PL-10 y PL-18, en el flanco SW también se hunde en dirección al PL-14. La potencia oscila entre 1,90 y 6,20 m. Las variedades de caolín presentes son blanco grisáceo y blanco rosáceo de textura arenosa y talcosa.

Sector Loma Sur: En este sector se localizaron tres cuerpos (posibles lentes) hacia la porción noroccidental del sector, los mismos poseen longitud aproximada 100 m, ancho promedio 60-70 m, potencia que varía entre 3,30 – 6,00 m. Todos poseen dirección SE-NW. La variedad de caolín presente es blanco y blanco grisáceo de textura arenosa muy fina.

d. Yacimiento: Cayo Guam (CG)

El depósito está ubicado al sureste de la localidad de Moa, provincia de Holguín, específicamente en las márgenes del río Cayo Guam, a unos dos km de la carretera Moa-Baracoa, a 200 m aproximadamente de la antigua planta de Beneficio de Cromo. Posee más 10000 m² de extensión y una potencia promedio de 15 m. La génesis del yacimiento está determinada por la alteración de los feldespatos producto de la meteorización de los gabroides. Se considera un yacimiento "residual" que es el tipo genético también de las lateritas níquelíferas que está a su alrededor, lo que lo diferencia es la roca madre. La mineralogía del yacimiento está constituida fundamentalmente por arcillas caoliníticas, gibbsita y óxidos de hierro, puede haber presencia de minerales arcillosos del grupo de las esmectitas. El depósito tiene grandes taludes donde se pueden diferenciar sectores con variedad de tonalidades. En

la base del depósito afloran gabros muy meteorizados alterados a un material de color blanco y aspecto terroso - arcillosos, muy deleznable en estado seco y con una alta plasticidad al humedecerse. Hacia la parte superior existe una transición gradual a materiales similares a los de la base del corte, formando una corteza de meteorización de colores variables desde el rosado hasta el rojo intenso, lo que indica un incremento en el contenido de hierro y que durante el proceso de alteración hubo un incremento considerable de alúmina y la consecuente migración del hierro, calcio y magnesio para la formación de la caolinita como mineral residual la cual tuvo su origen en la meteorización de cuerpos de gabros formando potentes capas que constituyen depósitos de gran extensión. (Evaluación preliminar y caracterización de la manifestación de caolinitas en la zona de Cayo Guam, Moa Marabih Fadel Luali). Se pueden diferenciar sectores (litología) de color blanco-amarillento, amarillo- pardo y blanco – rosáceo, abigarrado y blanco – grisáceo.

e. Yacimiento: El Yigre (YG)

La secuencia arcillosa Arcillas Bamburanao se distribuye por el norte de los municipios Yaguajay y Chambas. Se extiende en forma de franja alargada con ancho de 1,5-4,5 km y longitud 50 km con dirección NW-SE. Las arcillas constituyen el componente principal de este depósito, se distinguen dos tipos fundamentales: arcillas de color gris a verdoso y arcillas de color amarillo ocre a pardo rojizo. Las primeras, se caracterizan por ser muy finas, de estratificación insipiente, en ocasiones bien manifestada, se observa intercalaciones de CaCO_3 y es muy frecuente la presencia de cristales de yeso de tamaño 0,5 a 1,5 cm, son muy plásticas y se descomponen fácilmente en agua. Las segundas se difieren en la coloración, poseen abundantes perdigones de hierro y manganeso de hasta 1 cm de diámetro. Son de estratificación masiva, plásticas, y también y se desintegran fácilmente en presencia de agua. Son comunes fragmentos de silicitas (una plagioclasa) y calizas. Se depositan en un ambiente lacustre con comunicación intermitente con el mar, en sentido muy general ha surgido bajo una influencia mezclada de factores marinos y continentales en la zona del límite móvil mar – tierra.

f. Yacimiento: Castaño (CT)

Ubicado en la Zona Estructuro Facial Zaza, específicamente en la Cuenca de Cabaiguán, está compuesta por numerosas formaciones sedimentarias desde el Cretácico hasta el Cuaternario, formadas por argilitas y margas ínterestratificadas. Son arcillas plásticas de color gris oscuro en la superficie y a medida que se profundiza se va haciendo gris amarillento con manchas pardas, con inclusiones de fragmentos y concreciones de CaCO_3 de hasta 0.5 cm. Debido a su cercanía a la Fábrica de Cemento Siguaney se valora su posible explotación a escala industrial para la obtención de cementos con alto grado de sustitución ya que actualmente está concesionada a la misma para la fabricación de clínquer.



2.3.1 Tablas resúmenes de las diferentes características de los yacimientos

Tabla 1: Composición química de los depósitos

Depósito	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	Otros	PPI
MG*	57,79	18,71	7,07	1,85	1,80	0,02	2,68	0,65	-	-	0,12	0,76	8,57
MG**	43,89	24,73	11,13	1,38	2,63	0,08	1,99	1,10	-	-	0,14	3,11	9,81
CG	39,55	31,58	12,68	0,05	0,53	0,13	0,14	0,17	0,52	0,04	0,14	0,24	14,37
PZ	41,99	26,12	16,97	0,05	0,62	0,04	0,08	0,47	0,63	0,23	0,04	0,17	12,62
LS	50,88	25,23	12,58	0,28	0,95	0,02	0,08	0,32	0,98	0,05	0,04	0,29	8,39
LL	61,40	18,86	9,61	0,07	0,15	0,02	0,26	0,90	0,62	0,13	0,03	0,21	7,80
YG	46,58	20,06	14,41	2,94	0,74	0,04	0,11	0,06	1,12	0,13	0,73	0,14	12,74
CT	51,29	10,39	5,24	13,09	2,27	0,09	1,04	0,84	0,54	0,14	0,15	0,13	14,80

- *Roca arcillosa ** Fracción arcillosa

Tabla 2: Composición mineralógica de los depósitos

Depósito	Arcilla tipo 1:1	Arcilla tipo 2:1	Fases asociadas
MG	Caolinita	montmorillonita, illita	feldespato, cuarzo
PZ	Caolinita	Montmorillonita	cuarzo, goethita
CG	caolinita/halloysita	Montmorillonita	cristobalita, hematita
LL	caolinita/halloysita	---	cuarzo, hematita
LS	Caolinita	Vermiculita	cuarzo, goethita
YG	Caolinita	---	cuarzo, calcita
CT	---	Montmorillonita	feldespato, cuarzo, calcita

Tabla 3: Contenido de caolinita equivalente

	CG	PZ	LS	YG (*)	LL	CT (*)
Caolinita equivalente	79,16	65,12	55,54	45,33	41,81	13,92 (**)
K _{eq} (%)						

- (*) Calculado a partir de la corrección del contenido de calcita

- (**) Equivalente a un contenido de 38,81% de minerales arcillosos tipo 2:1

Actividad puzolánica

Resistencia mecánica

En la **Tabla 4** se muestran los valores de resistencia a la compresión relativa o el índice de actividad resistente de los morteros normalizados con un 30 % de sustitución de Cemento Pórtland Ordinario (CPO) por los productos de calcinación a 750 y 850°C de las muestras compósito de los siete depósitos seleccionados. Como valores de referencia se utilizan los resultados de resistencia a la compresión de una serie con 100% CPO.

Los morteros presentan en la mayoría valores de índice de actividad resistente, adecuado de acuerdo a los criterios de actividad puzolánica expresados en la norma NC TS. 528. Sin embargo, la reactividad de los materiales arcillosos calcinados del depósito YG y CT a los 7 días es pobre. A los 28 días comienzan a incrementarse las resistencias de estos dos materiales. La tendencia en la evolución de la resistencia a la compresión es similar para estos sistemas, lo que sugiere que las diferencias observadas son la expresión de una diferencia en el contenido de material reactivo.

La reactividad puzolánica, determinada a partir del calor total acumulado según el Ensayo R³ mostrados en la **Tabla 5** guarda cierta correspondencia con estos resultados. Para una temperatura de calcinación de 750°C las muestras se ordenan en orden decreciente de reactividad puzolánica de la siguiente manera: LS>YG>LL. A la temperatura de calcinación de 800 ° C el orden es CG>PZ>LS>YG>LL, y correlaciona con el contenido de caolinita equivalente. Sin embargo, a la temperatura de calcinación de 850°C las muestras se ordenan en orden decreciente de reactividad puzolánica de la siguiente manera: CG>LS >PZ>YG>LL>>YG. La menor reactividad de las arcillas YG y CT, a las temperaturas de 850°C se considera por la posible disminución de la superficie específica por la presencia CaCO₃ presente en estas muestras. Por lo tanto, para esta muestra se recomienda disminuir la temperatura de calcinación al rango 750-800°C, para evitar la influencia negativa del CaCO₃ a 850°C, que conduce a la disminución de la reactividad.

Tabla4: Índice de actividad resistente

	YG-850	LL-850	LS-850	PZ-750	PZ-850	CT-750	CT-850	CG-750	CG-850
7d	69	95	98	104	113	99	81	121	129
28d	81	92	91	96	96	100	90	109	114

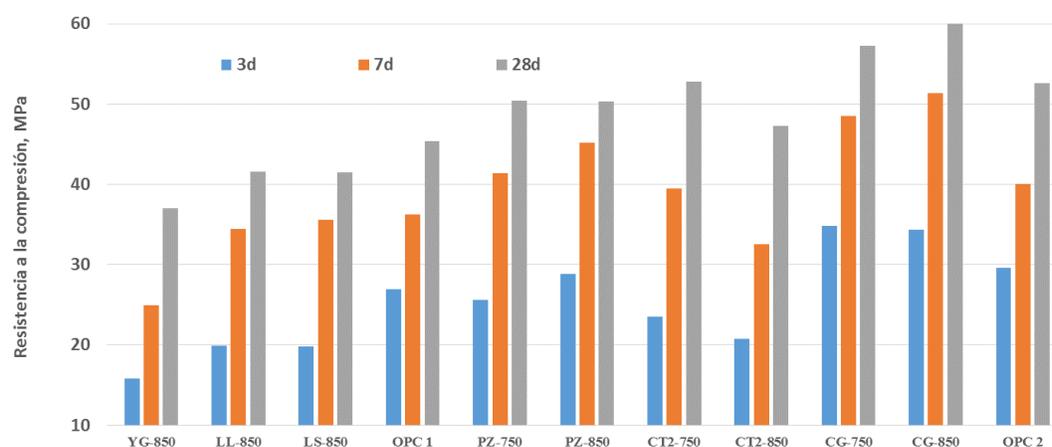


Figura 1. Resistencia a la compresión de los depósitos YG, LL, LS, PZ, CT, CG.

Tabla 5: Resultados del protocolo de ensayo R³

	LS			LL			YG			CG		PZ	
	750	800	850	750	800	850	750	800	850	800	850	800	850
Temperatura de calcinación. (°C)	750	800	850	750	800	850	750	800	850	800	850	800	850
Calor Total Acumulado a las 120h (J/g)	124,23	113,93	193,21	95,36	101,10	145,53	116,49	111,30	68,46	145,98	234,03	130,35	185,69

2.4 Propuesta de modificación de la NC 527:2013 y de la NC 528:2013.

2.4.1 Clasificación de las arcillas utilizadas como fuente de materias primas para la obtención de materiales puzolánicos.

a. Muestreo de la materia prima

El muestreo del yacimiento o depósito arcilloso bajo estudio se efectuará siguiendo las recomendaciones establecidas en el Manual de Instrucciones de la Actividad de Investigación Geológica (abril 20015, Código: IAG 03)

b. Determinación de la composición química

Para la preparación de las muestras se aplicarán los procedimientos exigidos en las siguientes normas: Para el análisis químico, Instrucciones técnicas normativas elaboradas por LACEMI, 1986. Los resultados de control se elaborarán según las normas NC 505:2007, NC 507:2007, NC 44-16:1970, NC 44-18-5:1984. NR-MG-5-04 Trabajos Analíticos: Control Geológico de la Calidad y la NRIB-269 Control Interno de la Reproducibilidad de los Resultados de los Análisis Básicos Cuantitativos de materia prima minerales, para el área geológica. Los requisitos de composición química propuestos para las arcillas utilizadas como fuente de materias primas para la obtención de materiales puzolánicos a partir de su calcinación se presentan en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Requisitos de composición química para las arcillas utilizadas como fuente de puzolanas.

CaO (% máximo)	5.00 %
MgO (% máximo)	2.00 %
SO ₃ (% máximo)	0.50 %
Al ₂ O ₃ (% mínimo)	18.00 %

c. Determinación del contenido de grupos OH- asociados a los minerales arcillosos

La arcilla en su estado natural se seca a 150°C durante 8h y posteriormente se muele hasta una finura del 90% de pasado en el tamiz de 90 micras. Luego se procede de la siguiente manera:

- Se toman tres cápsulas de porcelana y se pesan en una balanza analítica, de precisión $\pm 0.001\text{g}$
- En cada cápsula de porcelana se pesan aproximadamente 50 g de la arcilla en su estado natural, secada y molida.
- Las cápsulas con el material arcilloso se calientan a 200°C durante 8 horas. Luego de transcurrido este tiempo, se retira la cápsula con la arcilla, se deja enfriar dentro de una desecadora y luego se pesa, se sustrae el peso de la cápsula y se anota el valor. Este valor se denominará en lo adelante como peso seco (PS).

- Las cápsulas con el material arcilloso se calientan a 350°C durante 2 horas. Luego de transcurrido este tiempo, se retira la cápsula con la arcilla, se deja enfriar dentro de un desecadora y luego se pesa y se anota el valor. Este valor se denominará en lo adelante como peso inicial (P0).
- Las cápsulas con el material arcilloso se calientan a 850°C durante 2 horas. Luego de transcurrido este tiempo, se retira la cápsula con la arcilla, se deja enfriar dentro de un desecadora y luego se pesa y se anota el valor. Este valor se denominará en lo adelante como peso final (PF).
- Para el cálculo de la pérdida de agua asociada a los OH- estructurales en los minerales arcillosos, se procede de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% H_2O = \frac{100 * ((P0 - PF) - 0.79 * (\%CaO))}{PS}$$

Solo en aquellas muestras donde la calcita esté presente como mineral acompañante se emplea el segundo término de la ecuación (en rojo), como una forma de corregir las pérdidas de peso asociadas a la descomposición de la calcita, mineral que se descompone en el intervalo de temperaturas analizado y que puede presentarse con relativa abundancia en los depósitos arcillosos de origen secundario (redepositados). Como valor final para el cálculo de la pérdida de agua asociada a los OH- estructurales en los minerales arcillosos se toma el valor promedio de las tres muestras analizadas.

d. Determinación del contenido de minerales arcillosos

El contenido de minerales arcillosos en la muestra se expresa como % de Caolinita Equivalente (%C_{eq}), el cual se calcula según la fórmula que se presenta a continuación, asumiendo que la pérdida de agua asociada a los OH- estructurales en los minerales arcillosos proviene únicamente de descomposición de la caolinita:

$$\% C_{eq} = \frac{100 * (\%H_2O)}{13.95}$$

e. Determinación de las potencialidades de las arcillas como fuente de puzolanas

Los contenidos de aluminio y silicio, expresados como %Al₂O₃ y %SiO₂, respectivamente, y determinados a partir de los métodos de análisis químicos correspondientes, y la pérdida de agua asociada a los OH⁻ estructurales en los minerales arcillosos, son normalizados a un 100%, esto es, que la suma de los tres componentes sea igual a 100. Los valores obtenidos mediante esta normalización se grafican en un diagrama ternario Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O (OH⁻), que se muestra en la figura 1.1. Está bien establecido en la literatura que la reactividad puzolánica de los productos de calcinación de las arcillas 1:1 (grupo de las caolinitas; Al₂O₃ / SiO₂ ~ 0.85; H₂O (OH⁻) ~ 13.95 %) es superior a la de los minerales arcillosos de tipo 2:1 (esmectitas, micas, vermiculitas; Al₂O₃ / SiO₂ ~ 0.20 - 0.85; H₂O (OH⁻) ~ 5.00 %). Es por tanto lógico esperar que las potencialidades de una arcilla para ser utilizada como fuente de material puzolánico aumentan con el incremento de la relación Al₂O₃ / SiO₂ y del contenido de grupos OH⁻ en la estructura (% H₂O (OH⁻)). De acuerdo a estos criterios se definen en el diagrama ternario Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O (OH⁻) tres zonas, cuyas principales características se detallan en la Tabla 1.2.

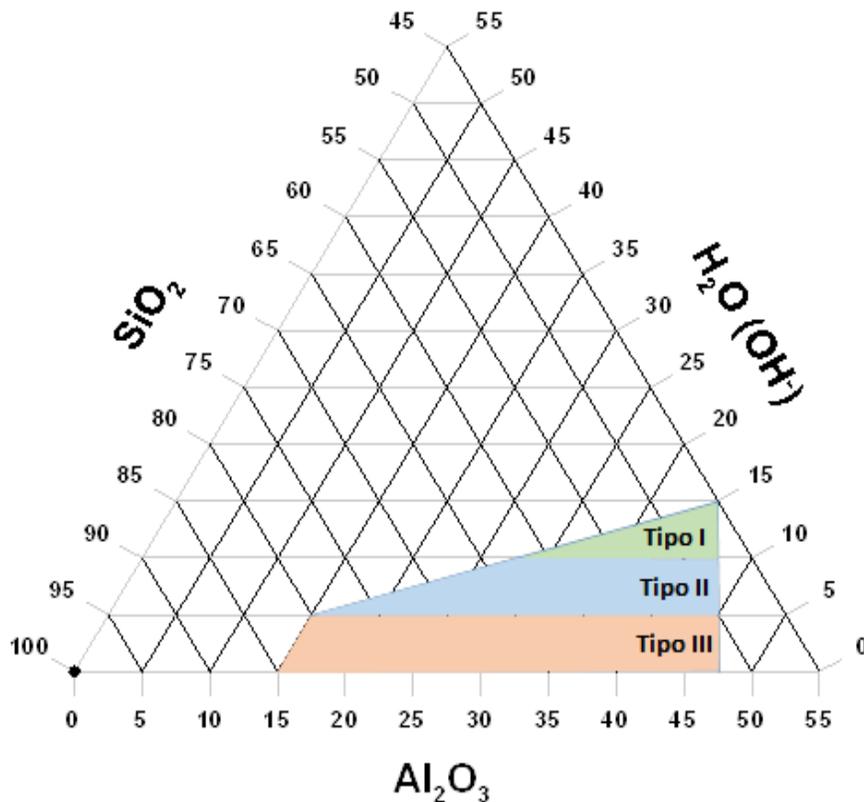


Figura 1.1 Diagrama ternario $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} (\text{OH}^-)$

Tabla 1.2 Clasificación de las arcillas según sus potencialidades como fuente de puzolanas

	Características generales	Reactividad potencial de los productos de calcinación	Temperaturas de calcinación recomendadas (°C)
Tipo I	Predominan las arcillas caoliníticas, con contenidos de caolinita superiores al 50%	Alta – Muy Alta	750 - 850
Tipo II	Predominan las arcillas caoliníticas, con contenidos de caolinita equivalente similares o superiores al 40 % Pueden encontrarse contenidos moderados de otros minerales arcillosos	Moderada – Alta	750 - 850
Tipo III	Predominan los minerales arcillosos 2:1 Pueden encontrarse contenidos de caolinita relativamente bajos	Baja – Moderada	800 - 950
Tipo IV	Similares a los Tipos II, pero con contenidos de calcita de hasta un 10%. Comúnmente asociados a depósitos arcillosos de origen secundario, por redeposición	Baja – Moderada – Alta	700 - 800

Nota: Para su uso como fuente de materias primas para la obtención de materiales puzolánicos se recomiendan las arcillas correspondientes a los grupos I, II y IV.

2.4.2 Métodos de evaluación de la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas.

a. Determinación de la reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia mecánica en morteros normalizados.

El análisis desde el punto de vista químico-mineralógico de las potencialidades de las arcillas a ser utilizadas a partir de la activación térmica de los minerales arcillosos presentes en las mismas se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios: 1) su composición mineralógica (identificación positiva de minerales arcillosos del tipo 1:1 del grupo de la caolinita mediante DRX y ATG) 2) su composición química (relativamente

altos contenidos de Al_2O_3) y 3) su comportamiento térmico (relativamente altos valores de pérdida de masa asociada a los grupos OH^- de los minerales arcillosos). El contenido equivalente de caolinita (% Ceq) se utiliza para expresar el contenido total de minerales arcillosos en la muestra y se calcula asumiendo que todos los OH^- liberados en el intervalo $350\text{-}850^\circ\text{C}$ corresponden a la caolinita. Para la realización de estos cálculos todos los parámetros están normalizados con respecto al peso seco a 200°C .

b. Determinación de la reactividad puzolánica mediante ensayos en pastas.

El fundamento de este ensayo consiste en someter la arcilla a un entorno químico similar al que se encuentra en la solución de poros del CPO, caracterizado por su alta alcalinidad ($\text{pH} \sim 13$), abundancia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y presencia de iones alcalinos e iones sulfato. A las pastas preparadas a partir de una combinación de arcilla calcinada, hidróxido de calcio, hidróxido de potasio y sulfato de potasio se les determina el agua químicamente enlazada asociada a la formación de productos de hidratación. Ambos parámetros son directamente proporcionales a la formación de productos de hidratación mediante la reacción puzolánica y han demostrado una excelente correlación con los resultados de los ensayos de resistencia mecánica en morteros normalizados.

Para este ensayo las pastas fueron preparadas utilizando una relación másica 3:1 de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / arcilla calcinada, y el KOH y el K_2SO_4 fueron añadidos de manera que se garantice una relación molar SO_3 / arcilla calcinada = 0.15 y K_2O / arcilla calcinada = 0.20. Una relación agua / sólido = 1,2 fue empleada para asegurar una buena laborabilidad de las pastas. Para preparar la pasta se pesan el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la arcilla, y se homogenizan. Por otra parte, el KOH y el K_2SO_4 se disuelven en el agua de amasado. Luego se unen los componentes sólido y líquido mezclando a 1300 rpm durante 2 min. Aproximadamente 80g de pasta se almacenan en recipientes plásticos de forma cilíndrica, completamente herméticos, y se almacenan en una estufa a 40°C durante 24h. Luego de este período de tiempo se extrae la pasta endurecida y se obtienen 3 fracciones de aproximadamente 15 a 20g de cada pasta a ensayar. Se secan en una estufa a 110°C hasta peso constante y se pesan en una balanza analítica. Luego se calientan en una mufla a 400°C durante 4h y se pesan nuevamente en una balanza analítica. La diferencia de peso entre la muestra secada a 110°C y la muestra calcinada

a 400°C se considera igual al agua químicamente combinada en los productos de hidratación de la reacción puzolánica y se reporta como % respecto a la masa inicial.



2.5 Conclusiones parciales del capítulo II.

- Hoy en Cuba se cuenta con seis yacimientos de arcillas caoliníticas con potencialidades para su uso como MCS, cercanos a las fábricas de Siguaney, Nuevita y Santiago de Cuba. En estos momentos se estudia el yacimiento de Pijirigua, cercano a la fábrica de Cemento de Artemisa.
- Las potencialidades de las arcillas aumentan con el incremento de la relación Al_2O_3/SiO_3 y del contenido de grupos OH^- en la estructura (% $H_2O(OH^-)$).
- Dada la presencia de arcillas caoliníticas ricas en aluminio (Al) se presentan en la materia prima como un %min Al $\geq 18\%$, la relación Al_2O_3/SiO_3 y la pérdida por ignición $\geq 7\%$.
- El Ensayo R^3 tiene como ventaja una buena correlación con los ensayos de resistencia, una utilización de menor cantidad de materiales y la obtención de una respuesta rápida donde el tiempo de ensayo se reduce a un 25%.

- La propuesta de modificación de la NC 527:2013 y NC 528:2013 se presentó al Comité Técnico de Normalización No. 22 “Cemento y Cal” para su análisis y discusión.

*Conclusiones y
Recomendaciones.*

Conclusiones.

- Hoy en Cuba se cuenta con seis yacimientos de arcillas caoliníticas con potencialidades para su uso como MCS, cercanos a las fábricas de Siguaney, Nuevita y Santiago de Cuba. En estos momentos se estudia el yacimiento de Pijirigua, cercano a la fábrica de Cemento de Artemisa.
- Las potencialidades de las arcillas aumentan con el incremento de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_3$ y del contenido de grupos OH^- en la estructura (% $\text{H}_2\text{O} (\text{OH}^-)$).
- La propuesta de modificación de la NC 527:2013 y la NC 528:2013 se presentó al Comité Técnico de Normalización No. 22 “Cemento y Cal” para su análisis y discusión.
- El Comité Técnico de Normalización No. 22 determinó circular nuestra propuesta a nivel de país como instructivo técnico para la determinación de las potencialidades de la activación de las arcillas para su uso como MCS.

Recomendaciones.

1. Presentar al CTN 22 la información complementaria a las NC 527 y 528: 2013 en formato de Instructivo Técnico, a nombre de la entidad que desarrolla la investigación (CIDEM).

Bibliografía.

Bibliografía.

1. Antoni M., Rossen J., F. Martirena, Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(12): p. 1579-1589. **(WoS)**
2. Prachi Patel, Jose Fernando Martirena Hernandez (feature editor), A Concrete Path to Sustainability, Material Research Society, MRS Bulletin, volume 38, September 2013, www.mrs.org/bulletin. *Energy Quarterly*. **(WoS)**
3. Vizcaíno Andrés, L. M., Antoni, M. G., Martirena Hernández, J. F., Scrivener, K. L., Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements, *Advances in Cement Research*, (in press) 2015 **(WoS)**
4. Martirena F., Vizcaíno L., Antoni Mathieu, Pierre Henocq, Adrian Alujas, Karen Scrivener "Durability of reinforced concrete made with low clinker, ternary blend cement", Proceedings XIII 67th RILEM Week. XIII Conference on Durability of Building Materials and Composites, Sao Paulo, 1-5 September 2014. **(WoS)**
5. L.M. Vizcaíno-Andrés, S. Sánchez-Berriel, S. Damas-Carreras, A. Pérez-Hernández, K.L. Scrivener, J.F. Martirena-Hernández, Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement, *Materiales de Construcción* Vol. 65, Issue 317, January–March 2015, e045 ISSN-L: 0465-2746 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00614> **(WoS)**
6. Adrian Alujas; Rodrigo Fernandez; Rafael Quintana; Karen L Scrivener; Fernando Martirena; Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products in OPC hydration; *Applied Clay Science* (in press) 2015 **(WoS)**
7. Ernesto Díaz, Fernando Martirena, Adrian Alujas, Roberto Torrent; Low Carbon Cement: Durability Performance Assessment with Laboratory and Site Tests. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_34 **(WoS)**
8. A. Perez, A. Favier, F. Martirena, K. Scrivener; Influence Of The Manufacturing Process On The Performance Of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement; RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_35 **(WoS)**
9. Fernando Martirena, Karen Scrivener, Development And Introduction Of A Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement In Cuba. RILEM 2015. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_40 **(WoS)**
10. Adrián Alujas, J. Fernando Martirena Influence Of Calcination Temperature In The Pozzolanic Reactivity Of A Low Grade Kaolinitic Clay. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_41 **(WoS)**
11. Adrián Alujas, Roger S. Almenares, Sergio Betancourt, Carlos Leyva, Pozzolanic Reactivity Of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence Of Mineralogical Composition. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_42 **(WoS)**
12. Vizcaino Leng, Antoni Mathieu, Alujas Adrian, Martirena Fernando, Scrivener Karen; Industrial Manufacture Of A Low-Clinker Blended Cement Using Low-Grade Calcined Clays And Limestone As SCM: The Cuban Experience. RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3_43. **(WoS)**

Referencias Bibliográficas

- AL-AKHRAS, N. M. 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36, pp 1727-1734. .
- ALUJAS, A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Universidad Central de Las Villas.
- AUTORES, C. D. 2003. Impactos Ambientales y Actividades Productivas. *Cemento, Cal y yeso*.
- AUTORES, C. D. 2010a. CATALOGO GENERAL DE NORMAS TECNICAS. *In: INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA, N. Y. M.-I. (ed.)*. Paraguay.
- AUTORES, C. D. 2010b. Evolución de las Normas para la fabricación de cemento y características de sus aplicaciones. . *Holcim Ecuador S.A.*
- AUTORES, C. D. 2012. El Concreto en la práctica. Qué, por qué y cómo? *CIP 30-Adiciones al Cemento*.
- AUTORES, C. D. 2016a. Cemento-EcuRed. *Cemento*.
- AUTORES, C. D. 2016b. Cemento-Productos y Servicios- CEMEX. *Cemento*.
- BAI, C. D. A. Y. J. 2003. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, pp 353-362.
- BONAVETTI, V. L., RAHHAL, V. F. & IRASSAR, E. F. 2001. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blended cements. *Cement & Concrete Research*, 31(6), pp 853-859.
- DAY, L. 1992. Pozzolans for use in low cost housing: state of the art report. *Department of Civil Engineering. Universidad de Calgary*, Report No. CE92-1. January.
- FERNÁNDEZ, R. 2009. Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries. Ph. D. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*. .
- FRÍAS, O. R. M. 2008. "Properties of calcined clay waste and its influence on blended cement behaviour. American Ceramic Society".
- GONÇALVES, C. D. A. Y. J. P. 2009. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction and Building Materials*, 23, pp 1971-1979. .
- GONZÁLEZ, A. G. 2009. *Caracterización y utilización de puzolanas como aditivo minerales activos en el cemento. Aplicación en viviendas de bajo coste*. Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Valencia.
- HARE, C. 2010. Normas ASTM para materiales de construcción.
- HARTSHORN, S. A., SHARP, J. H. & SWAMY, R. N. 1999. Thaumalite formation in portland-limestone cement pastes. *Cement & Concrete Research*, 29(8), pp 1331-1340.
- HARTSHORN, S. A., SWAMY, R. N. & SHARP J. H. 2001. Engineering properties and structural implications of portland limestone cement mortar exposed to magnesium sulphate attack. *Advanced Cement Research*, 13(1), pp 31-46. .
- HERNÁNDEZ, J. F. M. 2009. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. *Departamento de Ingeniería Civil. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*.
- IRASSAR, E. F. 2009. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A Review. *Cement and Concrete Research*, 39(3), pp 241-254. .
- IRASSAR, E. F., BONAVETTI, V. L. & MENÉNDEZ, G. 2010. Cementos con Material Calcáreo: Formación de Thaumalita por ataque de Sulfatos. *Revista de la Construcción*, 9(1), pp 63-73. .

- JHERSON E. DÍAZ, S. R. I., RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ Y MARISOL GORDILLO S. 2013. Mezcla ternaria de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la Construcción*, vol.12 no.3.
- JOSÉ FERNANDO MARTIRENA HERNÁNDEZ, M. R. F. 2015. LC 3 Limestone Calcined Clay Cement. *Project. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)* en Suiza, Universidad Central de las Villas, Cuba, tres prominentes Institutos Indios de Tecnología; IIT Delhi, IIT Madras e IIT Bombay.
- JR, T. A. B. 2013. Industria del cemento-Foresight Cuba. *On September 22, 2013*.
- JUAN JOSÉ DOPICO, F. M. H., ROBERT L. DAY, BERNHARD MIDDENDORF, MATTHIAS GEHRKE, LESDAY MARTINEZ 2008. Desarrollo de hormigones con aglomerantes cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Revista ingeniería de la construcción*, vol 23, 5.
- JUSTICE, J. M. 2005. Evaluation of metakaolins for use as Supplementary Cementitious Materials. *Master of Science in Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology*.
- KAKALI, G., TSIVILIS, S., AGGELI, E. & BATI, M. 2000. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃. *Cement & Concrete Research*, 30(7), pp 1073-1077.
- KANDASAMY, S. Y. S., M. H. 2014. The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction. *Cement & Concrete Composites*, (in press, corrected proof). *Available online 21 December 2013*.
- LAM L., W. L. Y. P. C. S. 2000. "Degree of hydration and gel/space ratio of high Volume fly ash/cement systems". *Cement & Concrete Research*, Vol. 30, No. 5, pp 747-756.
- LARA, R. C. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la actividad térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Universidad Central de Las Villas.
- LIANG L.H, M. V. M. 2000. "Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash". *Cement & Concrete Research*.
- MENÉNDEZ G., B., V. L. & IRASSAR E. F. 2003. *Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag*, *Cement and Concrete Composites*.
- MOIR, G. K., S 1997. Developments in manufacture and use of portland limestone cement. *Proceedings of the High-Performance Concrete, ACI-SP-172, 797-819 Malaysia*.
- NC528 2013. Especificaciones técnicas. *CEMENTO HIDRÁULICO — PUZOLANAS — ESPECIFICACIONES*.
- NEDHI, M. 2001. Ternary and quaternary cements for sustainable development. *Concrete International*, 23(4), pp 35-42.
- NICOLAS, M. 2015. Poner la técnica al servicio de la ecología. Nuevo estudio en industria de cementos cubanos. *Poner la técnica al servicio de la ecología. Semanario económico y financiero de Cuba*.
- OEY, T., KUMAR, A., BULLARD, J. W., NEITHALATH, N. & SANT, G. 2013. The filler effect: the influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates, *J. Amer. Cer. Soc.* 96(6), pp 1978-1990.
- PINO RIVERO, L. S. L., L. H.; HERNÁNDEZ RUIZ, J. E.; VILLAR COCIÑA E.; ALUJAS DÍAZ A. 2009. Arcilla cubana para su potencial uso como refuerzo en un material compuesto.
- PRICE L., W. E. Y. P. D. 1999. Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key developing Countries.
- QUALIN NIU, N. F., JING YANG, XIAOYAN ZHENG 2003. Effect of superfine slag powder on cement properties. *Cement & Concrete Research*, Vol. 32, No. 4, pp 615-621.
- RADLINSKI, M. Y. O., J. 2012. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume. *Cement & Concrete Composites*, 34(4), pp 451-459.

- RAMACHANDRAN, V. S. Z., C. M. 1986. Influence of CaCO₃ on hydration and microstructural characteristics of tricalcium silicate. *// Cemento*, 83, pp 129-152.
- RATHAN, R., PERUMAL, E. B. & SANTHAKUMARC, A. R. 2013. Evaluation and mix design for ternary blended high strength concrete. *Procedia Engineering*, 51(1), pp 65-74. .
- SABIR, B. B. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, pp 441-454. .
- SALAZAR, A. 2002. "Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos". *Corporación Construir, Cali*, 3° edición.
- SANTAMARÍA, F. S. 1982. La Normalización Nacional e Internacional de cementos. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Materiales de Construcción N."* 188 - 1982.
- SCHMIDT, M. 2003. Ultra-Hochleistungs-beton-Ausgangsstoffe, Eigenschaften und Leistungsfähigkeit. *Proceedings of the conference Ultra-Hochfester Beton University of Kassel, September. Germany.* .
- STANDARDS, C. N. B. O. 2001. Cemento Pórtland. *Especificaciones. Cuba.*
- TALERO, R. 2005. Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: kinetic and morphological differences. *Cement and Concrete Research*, 35, pp 1269- 1284. .
- TAYLOR, H. F. W. 1990. Cement Chemistry. *London: Academic Press: London, U.K.* 491.
- TAYLOR, H. F. W. 1993. Cement Chemistry. *Academic Press. London.* .
- VANCE, K., AGUAYO, M., OEY, T., SANT, G., & NEITHALATH, N. 2013. Hydration strength development in ternary Portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, 39(1), pp 93-103.
- VANDERLEY, M. 2002. On the sustainability of the Concrete. *Extended version of the paper commissioned by UNEP Journal Industry and Environment.* .
- VEGAS, I., GAITERO J. J., URRETA, J., GARCÍA, R. & FRÍAS, M. 2014. Aging and durability of ternary cements containing fly ash and activated paper sludge. *Construction & Building Materials*, 52(1), pp 253-260.