

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil



Trabajo de diploma

Título: Formulación y evaluación de cementos de bajo carbona con arcillas calcinadas del yacimiento Neptuno, Artemisa.

Autor: Ana Denia Fragoso Bernal
Tutores: Dc. Cs Fernando Martirena Hernández
Ing. Giselle Limontes Morales

Santa Clara
2017

PENSAMIENTO

“En los momentos de crisis, solo la imaginación es más importante que el conocimiento”

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres por su esfuerzo y sacrificio, sobre todo en los malos momentos

A mi abuela, por su ayuda y dedicación

A mis hermanos y Yely que son la alegría de mi vida y me dieron lo más lindo del mundo.

A Yosdany, mi vida, por querer mi constante superación.

A mis amigos, que sean de ahora en adelante para toda la vida: Adriana, Laís, María Cecilia, Dita y Leinier, toda esta experiencia sin ellos no habría sido posible en muchos aspectos.

AGRADECIMIENTOS

A Giselle por su apoyo en todo lo q necesite.

A Dayran por su ayuda, que comenzó siendo mi tutor sustituto y terminó siendo mi oponente, a ver si después que lees esto te desconcentro.

A Sergio Betancourt, el tutor de todos, la persona que sabe combinar el ser un excelente profesional con un pedagogo excepcional, un ejemplo en todos los sentidos.

A Adrián por hacerme caso de rato en rato.

A todos mis compañeros de materiales que supimos ayudarnos y apoyarnos en todo momento.

A los técnicos del laboratorio Felipe y Joel por su ayuda.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa las diferentes formulaciones de cementos ternarios elaborados a escala de laboratorio sobre la base del sistema clínquer-arcilla calcinada-carbonato de calcio en las proporciones 2:1 y 1:1 y que comprende la sustitución de un 50 y 35% de sustitución del clínquer.

Para la fabricación de estos cementos se utilizaron materias primas tales como la caliza y el yeso, procedentes de la fábrica de cemento Siguaney, la arcilla del yacimiento "Neptuno" en Artemisa y posteriormente calcinada e la FCA y el cemento procedente de la fábrica Carl Marx en Cienfuegos.

La evaluación de los cementos obtenidos se realizaron a través de los distintos ensayos físico-mecánicos, la reología por medio del método del Minicono y la cinética de las reacciones fueron analizadas mediante Calorimetría Isotérmica. La influencia de la finura de los componentes del cemento compuesto fue analizada a través de la resistencia a la compresión y la evolución de calor.

En general los cementos en su mayoría cumplieron con la NC 96-2011. *Cemento con adición activa. Especificaciones* y las formulaciones obtenidas de los LC³ 65 superaron en más de un 30% las resistencias esperadas.

ABSTRACT

The present work evaluates the different formulations of ternary cement made on a laboratory scale based on the calcination-calcium carbonate test system in the ratio 2: 1 and 1: 1 and comprising the substitution of 50 and 35% of clínquer replacement.

For the manufacture of these cements he used raw materials such as limestone and gypsum, the Siguaney cement factory procedures, the "Neptune" ore deposit at Artemisa and then calcined the FCA and the cement comes from the Carl Marx in Hundred fires.

The evaluation of the cements was carried out through the various physical-mechanical tests, the rheology by means of the Minicono method and the kinetics of the reactions were analyzed by Isothermal Calorimetry. The influence of the fineness of the components of the composite cement was analyzed through the compressive strength and the evolution of heat.

In general the cements mostly complied with the NC 96-2011. Cement with active addition. Specifications and formulations obtained from the LC3 65 exceeded by more than 30% the expected resistances.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	10
Capítulo I. Producción de cemento de bajo carbono con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza. Estado del arte	14
1.1- Cemento Portland. Generalidades.....	14
1.1.2- Impactos en la reducción del factor de clínquer	15
1.2- Materiales Cementicios Suplementarios	16
1.2.1- Cenizas volantes, escorias de alto horno y humo de sílice.	17
1.2.2- Piedra caliza	18
1.3- Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.....	19
1.3.1-Activación de las arcillas	19
1.3.2- Arcillas caoliníticas: metacaolín	19
1.3.3- Arcillas calcinadas de baja pureza.....	20
1.4 El Sistema clínquer-arcillas calcinadas -carbonato de calcio	21
1.4.1- La hidratación del cemento	22
1.4.2- La reacción puzolánica	24
1.5- Normativas.....	25
1.5.1- Norma Cubana	25
1.5.2- Norma Europea	25
1.5.3- Norma Americana	26
1.6- Cementos de Bajo Carbono. Propiedades físico-mecánicas	27
1.6.1- Resistencia mecánica	27
1.6.2- Finura	29
1.8- Conclusiones parciales del capítulo	29
Capítulo II: Fabricación de cementos de bajo carbono a escala de laboratorio	31
2. Materiales y métodos	31
2.1 Generalidades	31
2.1.1 Diseño Experimental	31
2.2 Procedimiento para la elaboración de los cementos.....	32
2.3 Selección y caracterización de las materias primas	32

2.3.1 Arcilla calcinada con adición de caliza y yeso en la formación de LC2	33
2.3.2 Caliza	35
2.3.3 Cemento	35
2.3.4 Yeso	36
2.3.5 Árido normalizado.....	36
2.3.6 Agua	37
2.4 Protocolo de molienda y obtención de los cementos	37
2.4.1 Ajuste de sulfatos.....	38
2.5 Ensayos para la caracterización del cemento	39
2.5.1 Peso Específico (g/cm ³) por Blaine	39
2.5.2 Finura (Por Tamizado)	41
2.5.3 Determinación del fraguado inicial y final	41
2.5.4 Ensayo de resistencia mecánica	43
2.6 Ensayos en pastas de cemento	47
2.6.1 Minicono	47
2.6.2 Calorimetría Isotérmica.....	48
2.7 Conclusiones parciales	49
CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE CEMENTOS DE BAJO CARBONO	50
3. Generalidades	50
3.1. Análisis de los resultados de los cementos	50
3.1.2 Ensayos de resistencia mecánica de morteros fabricados con cementos ternarios	52
3.1.3 Comparación entre los resultados de la resistencia a compresión de los cementos SIG B-45, 2015 y 2017.	53
3.2 Análisis de los resultados en pastas	54
3.2.1 Ensayo del Minicono	54
3.2.2 Calorimetría Isotérmica.....	56
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	60
Bibliografía	61
ANEXO	65
Anexo II Valores de Resistencia a Compresión y a flexo-tracción.....	66
Anexo III Valores del Minicono	68

Anexo IV Análisis estadístico del ensayo del Minicono..... 69

Introducción

El cemento se fabrica a partir de una mezcla de clínquer y yeso que actúa como controlador de fraguado. Además se le pueden añadir otro tipo de adiciones activas como cenizas volantes, escorias de alto horno, caliza, humo de sílice o puzolanas. El proceso de fabricación consta de 6 etapas importantes: Obtención materias primas, preparación de las materias primas, molienda de crudo, cocción en el horno rotativo, molienda de cemento (clínquer + adiciones), almacenamiento y expedición.

La producción industrial de cemento Portland a nivel mundial es un indicador económico y de desarrollo industrial para cada país, constituyendo uno de los sectores en el que la oferta no responde a la demanda actual por estar en constante crecimiento. Según la última estadística brindada por Index Mundi, en su reporte Hydraulic Cement: World Production, By Country se registra una producción de 2310 millones de toneladas de cemento, siendo China el país con más producción de cemento en el mundo, tendencia que se repite en los últimos registros. Si bien es cierto que las actividades económicas desarrolladas por el hombre generan los bienes y servicios que garantizan su bienestar social, también debemos tener en cuenta que estas son cada día más complejas de forma tal que mantengan el nivel alto la productividad exigente en la actualidad. Sin embargo, muchas de esas actividades son fuentes de contaminación, lo que constituye un problema que afecta la vida sobre el planeta. Uno de los principales enemigos que tiene la producción de cemento es precisamente la contaminación ambiental, por cada tonelada de clínquer, que es la base del cemento, manda al aire una tonelada de CO_2 . Otro elemento contraproducente es que para quemar la arcilla y la cal se produce un gasto de combustible importante. Esta situación obliga al hombre a pensar en disminuir la contaminación de las grandes fábricas de cemento y para ello se hace obligatoria la formulación de cementos verdes o ecológicos, con sustituciones de clínquer, que contribuya a disminuir las emisiones de gases a la atmósfera.

En este sentido Cuba está a la vanguardia, no solo fuimos el primer país productor de cemento en América Latina, en 1895, sino que además en la actualidad somos el primer país productor de cemento ecológico. La sustitución de un porcentaje del clínquer a partir del empleo de materiales cementicios suplementarios (MSC), ha sido reconocida como la vía más efectiva para reducir las emisiones de CO_2 y los gastos energéticos asociados a la fabricación del cemento, al mismo tiempo que pueden mejorar o mantener sus propiedades físico mecánicas

y químicas. Análisis preliminares indican que podría reducirse el gasto en la producción del cemento hasta en un 35 o 40 % del actual.

Entre los principales resultados científicos del país en el 2015, destaca el proyecto de desarrollo y producción industrial del cemento de bajo carbono en Cuba, de la autoría del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (Cidem), perteneciente a la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), el cual, dada su trascendencia, obtuvo uno los Premios Nacionales de la Academia de Ciencias de Cuba, además de merecer Premio Especial del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente por su impacto económico. Se trata de una iniciativa nacida de la cooperación entre la principal universidad villaclareña, la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en Suiza y un grupo de organizaciones académicas y de desarrollo en la India, lo cual ha permitido alcanzar un logro científico de incalculable valor, teniendo en cuenta la alta demanda de cemento a nivel mundial. Fue así como, tras varios experimentos, se llegó al novedoso resultado, alcanzado a partir de la sustitución de una gran parte del clínquer utilizado en la fabricación del referido polvo, por arcilla calcinada y carbonato de calcio, lo cual reduciría entre un 20-30 % de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con otros tipos de cementos. Otro logro que avala la utilidad de la innovación, es que el producto conseguido permite casi duplicar la cantidad de cemento producido por los métodos tradicionales, aclara el científico, quien añade que el LC3, como también se le llama, alcanza propiedades similares o incluso superiores al Portland, y su mezcla puede ser producida de manera muy fácil en las líneas existentes en Cuba y otras regiones del mundo, con el único requerimiento de pequeñas inversiones de capital.

Desde entonces numerosos son los estudios que se han venido realizando sobre las diferentes aplicaciones de este cemento LC3. El presente trabajo propone el estudio de diferentes formulaciones de cementos ternarios elaborados a escala de laboratorio sobre la base del sistema clínquer-arcilla calcinada-carbonato de calcio en la proporciones 2:1 y 1:1 y que comprende la sustitución de un 50 y 35% de sustitución del clínquer, para lo cual se plantea el siguiente problema científico:

Problema científico:

- ¿Cómo se comportan las características físico-mecánico de los cementos de bajo carbono con arcilla calcinada del yacimiento “Neptuno” en comparación con cementos similares obtenidos en estudios anteriores?

La hipótesis

- Los cementos de bajo carbono con arcillas del yacimiento “Neptuno” producidos a escala de laboratorio presentan un adecuado comportamiento físico-mecánico.

El **objetivo general**

- Evaluar el comportamiento físico-mecánico de los cementos de bajo carbono con arcillas del yacimiento “Neptuno”.

Como **objetivos específicos** se plantea:

1. Caracterizar la arcilla del yacimiento “Neptuno” en Artemisa como materia prima en la formulación de cementos de bajo carbono.
2. Evaluar las propiedades físico-mecánicas de diferentes formulaciones de cementos de bajo carbono con arcilla calcinada del yacimiento “Neptuno”.
3. Evaluar la cinética de hidratación de los cementos de bajo carbono elaborados a partir de productos de calcinación de la arcilla de “Neptuno”
4. Para dar cumplimiento a los objetivos anteriormente mencionados se proponen como **tareas científicas**:

- Caracterizar de forma química y mineralógica de arcillas caoliníticas del yacimiento “Neptuno” en Artemisa.
- Evaluar la reología a partir del ensayo del Minicono según la NC
- Evaluar la finura de los cementos de bajo carbono según la NC
- Evaluar la resistencia mecánica de las distintas formulaciones de LC3
- Evaluar la cinética de las reacciones y el calor liberado acumulado de los distintos cementos.
- Comparar los resultados de las distintas formulaciones de cemento de bajo carbono con resultados anteriores.

La **novedad científica** de este trabajo se sustenta en la demostración experimental a través de la producción de cementos donde se sustituye de un 50% hasta un 65% del clínquer por una mezcla de arcilla calcinada de bajo grado y caliza, en el que las propiedades tanto físico-mecánicas y químicas cumplan con los requisitos de las normas cubanas vigentes.

La **actualidad** de la investigación permite dar una respuesta significativa a la demanda de cemento en Cuba a través de una alternativa ecológica que nos sitúa en la vanguardia mundial.

Esta permite reducir entre un 20-30% la emisión de CO₂ y la posibilidad producir la misma cantidad de cemento con la mitad del clínquer producido actualmente.

Los **aportes** del trabajo:

En el orden práctico: Se produce un cemento de bajo carbono sobre la base de un sistema ternario base clínquer-arcilla calcinada-caliza a partir del tratamiento de las materias primas principales.

Estructura de los capítulos

Capítulo I: Marco teórico y metodológico.

Se realiza una revisión y análisis de la bibliografía existente en cuanto a cementos, adiciones a los cementos, los MCSy los cementos de bajo carbono que existen y las posibles dosificaciones a emplear para su fabricación, así como sus potencialidades

Capítulo II: Materiales y métodos.

Se describe el proceso de selección y caracterización de las materias primas y la fabricación de LC²2:1 y LC²1:1 para la elaboración de los cementos de bajo carbono LC³ 50 y LC³ 65 para su respectivo análisis físico-mecánicos. Se expone el diseño de experimentos y se explica la molienda de las materias primas.

Capítulo III: Análisis de resultados de los ensayos físico-mecánicos

Se exponen los resultados obtenidos en los ensayos físico-mecánicos y se evalúa los distintos cementos de manera que cumplan con la NC 95:2011 *Cemento Portland*-. Se comparan estos resultados con otras normas vigentes y con los diferentes estudios realizados. Luego se presentan las conclusiones, las recomendaciones, la bibliografía y los anexos del informe.

Capítulo I. Producción de cemento de bajo carbono con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza. Estado del arte

1.1- Cemento Portland. Generalidades

La fabricación de cemento conlleva un impacto ecológico inherente a sus procesos de manufactura a diferencia de otros materiales de construcción como la madera y el acero. [33] El CP es una mezcla de clínquer con adición de otros materiales que tienen como objetivo modificar sus propiedades. El clínquer se elabora a partir de una fusión de materiales que aportan sus principales componentes: cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. De manera general está compuesto por: el silicato tricálcico (C3S), el silicato bicálcico (C2S), el aluminato tricálcico (C3A) y el ferroaluminato tetracálcico (C4AF). Además de estos compuestos, que resultan los principales, el clínquer posee otros en menor proporción como: el óxido de calcio libre, el óxido de magnesio, los óxidos alcalinos, el óxido de titanio, el óxido de manganeso y cloruros; algunos de los cuales pueden afectar adversamente la durabilidad de los productos elaborados con el mismo (ESCALONA, 2011)

El proceso de obtención del cemento Portland se encuentra montado sobre la base de la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles), y se emiten a través del mismo significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, sobre todo en los procesos asociados a la producción de clínquer, el principal componente del CPO (MARTIRENA, 2003) Para solucionar los problemas medioambientales asociados a la producción de CPO la industria del cemento ha definido como medidas fundamentales mejorar la eficiencia energética, el uso de desechos como combustibles fósiles y la reducción de la relación clínquer / cemento en el aglomerante. (CASTILLO, 2010). Pero como la demanda de cemento es cada vez mayor y las materias primas necesarias comienzan a escasear se hace preciso la implementación de cementos con altos niveles de sustitución de clínquer (MARTINEZ, 2014)

Según (CARRASCO, 2009), los elementos fundamentales del clínquer aportan al CP diferentes propiedades dependiendo de sus características:

La *alita* (forma impura del C3S) se presenta como cristales incoloros y opacos de sección prismática con contornos rectangulares o hexagonales de unos 50 μm aproximadamente. Es

una fase hidráulicamente activa con una elevada velocidad de hidratación que determina la alta resistencia inicial que presenta el hormigón. La reacción del C3S es exotérmica y la cantidad de calor liberado total está en el orden de 500 J/g.

□ La fase *belita* (forma impura de C2S) presenta cristales con mayor brillo que los del C3S los que poseen un tamaño en el orden de 30 μm . Son de forma redondeada y estriados, presentándose frecuentemente agrupados en zonas, o de a pares o dispersos. Presenta una velocidad de reacción más lenta liberando menor calor total (250 J/g) que el correspondiente al C3S, por lo que confiere al cemento una alta resistencia a largo plazo.

□ El C₃A reacciona inmediatamente con el agua y produce el fraguado (pasaje de estado fluido a sólido de la pasta) instantáneo de la pasta con una elevada liberación de calor (850 J/g). El color del cemento se debe a esta fase, puesto que es gris oscuro con forma rectangular, prismática y amorfa. El C₃A produce una pequeña contribución en la resistencia hasta los 28 días, posteriormente, su aporte se halla incierto.

□ La fase C₄AF reacciona rápidamente con el agua y produce el fraguado en pocos minutos. El calor liberado durante la hidratación es del orden de 420 J/g. Está compuesto por cristales prismáticos bien formados, con tonos pardos y de gran poder reflector, siendo capaz de reflejar los cristales de la fase de C₃A. (OLIVIER, 2012)

1.1.2- Impactos en la reducción del factor de clínquer

El nivel de sustitución del clínquer depende de la naturaleza y características química - físicas de cada material, así como de su variable disponibilidad en cada región. El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas, y la baja cinética de reacción de muchos MCS en comparación con la dilución del cemento. Algunos MCS provocan un incremento en la demanda de agua, que tiene un efecto negativo en la reología (. (PEKMEZCI, 2004), (TTUNALI, 2004), (LAWERENCE, 2005)

El aumento de los niveles de sustitución de clínquer ha estado liderado por las regiones con economías emergentes, como Latinoamérica, India y China, que se encuentran por encima de la media mundial de 22 % (CSI, 2010). Por el impacto que causa con respecto a la reducción de las emisiones de CO₂, al mismo tiempo que posibilitan el aumento de los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados (WBCSD, 2009)

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. Existe una estrategia común, sustentada en cuatro líneas de trabajo fundamentales(CSI-WBCSD, 2009)(CSI, 2010)(HENDRIKS, 1998) (i) la mejora en la eficiencia de los procesos, (ii) el uso de fuentes alternativas de combustibles, (iii) la captura y almacenaje de CO₂ y (iv) la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios. En este sentido, las acciones a tomar para la reducción de las emisiones causadas por la industria del cemento deben ser consideradas desde un enfoque regional, atendiendo a las características geopolíticas y tecnológicas de cada país, organización o fábrica.

1.2- Materiales Cementicios Suplementarios

Los MCS son adiciones silicoaluminosas que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, que molidas finamente, en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el CH liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes. Cuanto mayor sea el contenido de sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas, más reactiva resultará la adición. Este tipo de adiciones reciben también el nombre de puzolanas o materiales puzolánicos(OLIVIER, 2012); y estas pueden clasificarse en dos grandes grupos como naturales y artificiales (MASSAZZA, 1993)y su efecto en morteros y hormigones, ya sea por su adición al cemento o al propio hormigón, ha sido ampliamente reportado en la literatura. Las propiedades de las mezclas fabricadas, dependerán del tipo de puzolana empleada, pero de manera general, incrementan la resistencia a edades avanzadas y la impermeabilidad del producto final, aunque también tienden a incrementar la demanda de agua (ACI, 2001).

Dado el incremento de la producción mundial de cemento se ha hecho necesario implementar nuevas técnicas de elaboración del producto para disminuir su costo y la contaminación ambiental que durante su producción se genera. Para solucionar este problema se han tomado distintas estrategias dentro de las que se encuentran la modernización tecnológica, el uso de combustibles alternativos y el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) en sustitución del clínquer; siendo esta última la opción más viable para la Industria cubana, pues requiere de menores inversiones a corto plazo. (ALUJAS, 2010)(CASTILLO, 2010)(SCRIVENVER, 2008); (FERNANDEZ, 2013)

Las puzolanas naturales más comunes son las cenizas volcánicas, tobas zeolíticas – que son las más abundantes en Cuba – y tierras de diatomeas (BETANCOURT RODRIGUEZ, 1997)(MARTIRENA, 2003)(DAY, 1992). A pesar de presentar una gran variedad, las puzolanas naturales pasan por el problema de la disponibilidad.

Otro MCS ampliamente usado por la industria del cemento es el carbonato de calcio en forma de piedra caliza sin calcinar. Aunque este no constituye una puzolana, se le adjudica cierta reactividad, que es muy baja en los cementos convencionales, por lo que se añade habitualmente en pequeñas proporciones como material inerte. (DAMTOFT, 2008)

1.2.1- Cenizas volantes, escorias de alto horno y humo de sílice.

En el grupo de puzolanas artificiales se encuentran las pizarras, arcillas calcinadas, los residuos de productos cerámicos, así como las cenizas provenientes de procesos agrícolas como las de cáscara de arroz y las de bagazo de caña(BETANCOURT RODRIGUEZ, 1997). También incluye los subproductos o desechos de procesos industriales como son las cenizas volantes pulverizadas (PFA, por sus siglas en inglés), las escorias granuladas de alto horno (GBFS), y el humo de sílice (SF).

. La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas de electricidad; durante la combustión, las impurezas minerales del carbón tales como: arcilla, feldespatos, cuarzo y esquisto se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso el material fundido se enfría y solidifica como pequeñas esferas vítreas. Si bien las plantas de carbón siguen constituyendo la principal fuente energética en el mundo, la distribución de las reservas de este recurso y la producción asociada se encuentra controlada en más del 90 % por Estados Unidos, Rusia, China, India, Australia y Sudáfrica (HOOK, 2008). La producción de PFA, por tanto, se encuentra concentrada en esas regiones.

Las escorias granuladas de alto horno o GBSF, por otro lado, son un subproducto de la industria siderúrgica y constituyen, después de las cenizas volantes, el segundo MCS empleado en la industria del cemento (Humphreys and Mahasenan, March 2002). Por sus propiedades puzolánicas e hidráulicas, las normativas de cemento permiten su empleo como sustitutos de clínquer en cantidades superiores al 35 % establecido para el resto de los MCS. (EPFL DOCTORAL COUSE-SUPPLEMENTARY CEMENTICIOUS MATERIALS. LAUSANNE, 2010)(ASTM, 2000)(CEN, 2011)(MEYER, 2009)

En el caso del humo de sílice, microsílíce o SF, que es un subproducto de la producción de metales de sílice o aleaciones ferrosilíceas y se considera uno de los MCS más reactivos (Khan and Siddique, 2011), su adición está limitada por la EN 197 a un 10 %, pero ha resultado muy eficaz en cementos que contienen otras adiciones minerales con una cinética de reacción más lenta (GBFS, PFA y puzolanas), permitiendo incrementar el % de estos MCS en los cementos (DAMTOFT, 2008). Los volúmenes en que se genera la SF son considerados muy bajos y la disponibilidad del material, por tanto, despreciable.

1.2.2- Piedra caliza

El mineral más abundante y disponible para la producción de cemento es el CaCO_3 en forma de piedra caliza. La piedra caliza es usada habitualmente como fuente de CaO para la producción del clínquer de cemento Portland (CP), pero adicionalmente puede ser usada en su estado natural, finamente molida, como adición mineral ya que se usa ampliamente como material extensor del clínquer. La caliza, al ser molida conjuntamente con el clínquer que es más resistente, puede alcanzar valores muy altos de finura, lo cual acelera la hidratación de las fases de alita y alúmina, además de que suple las discontinuidades en la granulometría del clínquer al actuar como material de relleno entre sus granos (MENENDEZ, 2003).

El empleo de cantidades de hasta el 5 % de caliza como material minoritario, es una práctica regular en la producción de CP ordinario en más de 25 países. Se ha demostrado que adiciones entre 2 – 5 % intermolidas con el clínquer no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora. En este caso, el carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel, una parte reacciona sinérgicamente con el C_3A del cemento formando fases AFm (monocarbo y hemicarboaluminatos), que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia (LOTHENBACH, 2008), la otra parte de la caliza actúa como relleno inerte, proporcionando superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción y favoreciendo con ello las resistencias iniciales (PERA, 1999). Como generalmente los cementos tienen poco contenido de C_3A , la mayor parte de la caliza se considera no reactiva, predominando su efecto físico, que además influye de manera positiva en la reología de pastas, morteros u hormigones. (VISCAINO, 2015)

El carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel durante los procesos de hidratación, una parte reacciona sinérgicamente con las fases aluminicas de las arcillas calcinadas, dando lugar a la obtención de fases que estabilizan la fase ettringita,

propiciando con ello un incremento del volumen total de productos de reacción, el decrecimiento de la porosidad y por tanto el aumento de la resistencia. La otra parte de la caliza actúa como filler inerte, proporciona superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción, favoreciendo con ello las resistencias iniciales (MULLER, 2005)

1.3- Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario

1.3.1-Activación de las arcillas

Las arcillas en su estado natural no pueden ser usadas como puzolanas ya que presentan estructuras cristalinas estables que impiden la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica (SHI, 2001), por lo que deben ser sometidas a un proceso de activación que puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas (DELGADO, 2015)

La calcinación de las arcillas en una primera etapa de calentamiento facilita la extracción de las moléculas de agua adsorbida, y a medida que aumenta la temperatura elimina también el agua combinada químicamente en su estructura interna, lo que incrementa el desorden estructural y el contenido de fases activas (DANNER, 2013). El estado más reactivo ocurre cuando el material pierde completamente los grupos hidroxilos; durante este proceso se forma una estructura cuasi-amorfa en un estado metaestable, en el cual se reconoce la fuente de la actividad puzolánica. Si la temperatura se sigue incrementando, entonces ocurre la aglomeración de las partículas y re-cristalización en fases no activas como la mullita, cristobalita, cordierita y esteatita. (ALUJAS, 2010), (DANNER, 2013).

1.3.2- Arcillas caoliníticas: metacaolín

Las arcillas que contienen un alto grado del mineral caolinita son empleadas con éxito en la obtención industrial de puzolanas de alta reactividad a partir de su calcinación, para obtener el producto conocido como Metacaolín (MK) (MARTINEZ, 2015)

La caolinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$, se encuentra en el grupo de minerales arcillosos con la estructura más simple (solo dos láminas de filosilicatos). Contiene la mayor cantidad de grupos hidroxilos en su estructura y estos se encuentran ubicados en las capas externas, lo que facilita su pérdida (proceso de deshidroxilación) cuando es sometido a determinada temperatura, y por consiguiente, el desorden del aluminio, pues ambos están conectados directamente. Ello conlleva a un mayor desorden estructural con respecto al resto de las arcillas, que se traduce

en una mayor reactividad [85]. Adicionalmente, la caolinita, de entre los minerales arcillosos estudiados, requiere de la menor temperatura para la deshidroxilación de su estructura, la cual se considera ha sido completada a los 600 °C [85], mientras que la mayor actividad puzolánica se obtiene entre 700 – 850 °C [86]. Ello trae asociado un menor costo energético, además de conferirle a la caolinita una ventana térmica más amplia entre el comienzo del estado metaestable y la recristianización, lo que constituye una ventaja tecnológica (MURAT, 1983)

El estado de desorden estructural al que llegan las arcillas con un alto grado de pureza en el mineral caolinita una vez deshidroxiladas, las convierte en el producto comercial metacaolín (MK), donde el prefijo es usado para caracterizar el estado de cambio sufrido por la arcilla. Debido a los altos precios establecidos por los consumidores primarios, la industria del cemento solo retiene el 6 % de la producción de MK, por lo que el potencial para su empleo como MCS está condicionado por las características no favorables para el resto de las industrias (TIRONI, 2013) (MURRAY, 2002,)

El estado del arte de las tecnologías disponibles para la calcinación de arcillas muestra que los cuatro métodos empleados son: lecho fijo (horno a plato/bandeja), horno rotatorio, lecho fluidizado y calcinación instantánea o flash (BAPAT, 2012) . En un estudio publicado por (MURAT, 1983) se determinó que metacaolines obtenidos mediante calcinación por lecho fijo, poseían mayor grado de desorden estructural y por tanto proporcionaban resistencias mecánicas superiores que aquellos obtenidos mediante calcinación en horno rotatorio.

El empleo de una técnica u otra depende de muchos factores de índole económica y tecnológica, pero su aplicación para la producción de metacaolín, como material extensor del clínquer se revela como una de las alternativas de bajo impacto ambiental, con emisiones de CO₂ asociadas en el orden de los 175 kg de CO₂ por cada tonelada de MK, vinculadas a los procesos de extracción de la materia prima y la combustión de las mismas en el horno (BAPAT, 2012).

1.3.3- Arcillas calcinadas de baja pureza

A pesar de que en Cuba no existen considerables reservas de arcillas caoliníticas de alta pureza, sí existen en el territorio nacional yacimientos de arcillas multi-componentes con contenidos moderados y bajos de caolinita en presencia de otros minerales arcillosos potencialmente activables.

En investigaciones llevadas a cabo por la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza, se obtuvieron excelentes resultados al evaluar las propiedades puzolánica de un suelo arcilloso con solo un 40% de caolinita después de ser activado térmicamente, que permite sustituciones de hasta un 30%, sin comprometer las propiedades mecánicas y la durabilidad del cemento resultante (ALUJAS, 2010),(FERNANDEZ, 2006). En proyectos posteriores, empleando las mismas arcillas de baja pureza, se produjeron cementos aumentando el porcentaje de sustitución y se obtuvieron buenos resultados. Con esto se demostró que se puede elaborar un cemento ternario, con materias primas de nuestro país, compuesto por **clínquer, arcilla calcinada y caliza**, como fuente de carbonato de calcio.

1.4 El Sistema clínquer-arcillas calcinadas -carbonato de calcio

Sobre la base del aporte y las limitaciones de la incorporación de MCS en la formulación de cementos mezclados binarios, se han llevado a cabo investigaciones que combinan ventajas y desventajas de algunas adiciones, dando lugar a nuevas generaciones de cementos ternarios, incluso cuaternarios.

Los cementos mezclados con sistema ternario son los productos de la mezcla de tres componentes reactivos con los productos de hidratación del cemento que posibiliten disminuir aún más el contenido de clínquer en el aglomerante final.

La formulación de sistemas ternarios a base de cemento cal y puzolanas se basa en la suposición de que a mayor sustitución de cemento Portland, disminuye la cantidad de iones Ca^{2+} que se encuentra en la solución de agua de los poros, producida por la hidratación del cemento Portland y reduciendo la posibilidad de que tenga lugar la reacción puzolánica. También se puede evitar el fenómeno reportado como auto-neutralización, debido a la ausencia de hidróxido de calcio, el que se consume totalmente en la reacción puzolánica como es el caso de los hormigones de alto volumen de sustitución.(FERNANDEZ, 2011)

Varios estudios realizados anteriormente prueban que el metacaolín puede sustituir cemento en una proporción de un 30%. La piedra caliza molida es una fuente barata y ampliamente disponible de mineral calcita ($CaCO_3$). Es usada con frecuencia como relleno en la producción de cemento, en pequeñas proporciones. Cuando las adiciones son en el orden del 5% de clínquer, el cemento resultante exhibe propiedades iguales o ligeramente superiores debido al aumento de compacidad. Cuando la adición está entre 10-15%, los efectos resultantes son negativos (F, 2011).

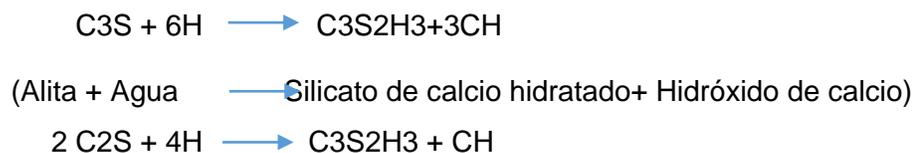
1.4.1- La hidratación del cemento

La hidratación del cemento involucra dos mecanismos diferentes: por disolución y por topoquímica. En el primero, los compuestos reactivos se disuelven y producen iones en solución, los cuales se combinan y dan lugar a la precipitación de compuestos hidratados; este proceso es predominante en las primeras edades de la hidratación. En el segundo mecanismo, las reacciones tienen lugar directamente sobre las superficies de los componentes sin que los mismos se encuentren en disolución; a este tipo de reacción se la conoce bajo el nombre de reacción en estado sólido o topoquímica y ocurre fundamentalmente en las edades más avanzadas de la hidratación (CARRASCO, 2009)

El cemento presenta distintas fases que se comportan de formas diferentes unas de otras, complicando aún más los procesos de fraguado. Unos minerales tienden a reaccionar muy rápido con el agua, mientras que otros lo hacen más lentamente, el C3A fragua rápidamente, lo cual no es conveniente por lo que es necesario utilizar el yeso que es un retardador del fraguado. La cal libre y el aluminato tricálsico también forman parte de los compuestos que reaccionan rápidamente formando el hidróxido de calcio. (TAYLOR, 1990)

La hidratación del CP ocurre mediante un gran número de reacciones simultáneas, por lo que se asume que este proceso en cada compuesto es independiente de los otros, para facilitar su comprensión.

Los silicatos de calcio al ser mezclados con agua se hidrolizan y producen un silicato de calcio hidratado y CH o portlandita proveniente del óxido de calcio liberado. Las reacciones que se producen pueden representarse aproximadamente por las ecuaciones:



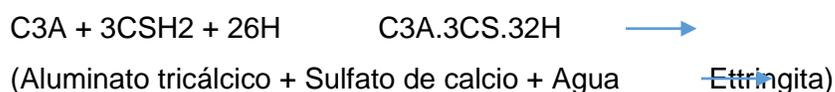
(Belita + Agua Silicato de calcio hidratado + Hidróxido de calcio)

Los silicatos de calcio hidratados son los responsables de las resistencias mecánicas y demás propiedades deseables de la matriz cementicia, mientras que el CH formado en estas reacciones, provee una alta alcalinidad a la pasta, con un valor de pH = 12.5, garantizando una buena protección frente a la corrosión de los aceros de refuerzo embebidos en el hormigón y el aumento de la resistencia de la pasta de cemento ante el ataque por ácidos (CARRASCO, 2009)

Como el C3A presente en el clínquer reacciona inmediatamente con el agua y provoca el fraguado instantáneo, permite la formación de aluminatos hidratados en fase metaestable como el C4AH19 y C2AH8 cuyos cristales tienen forma de platos hexagonales y con el transcurso del tiempo se transforman a una fase menos soluble y más estable de composición C3AH6. Dicha reacción puede representarse mediante la siguiente ecuación:



Para retardar la reacción de los aluminatos se adiciona yeso (3CSH2). Durante la reacción entre C3A y los iones sulfato (SO4²⁻) provenientes de la disolución del yeso, se produce inicialmente un sulfoaluminato de calcio pobre en iones sulfato (MATHIEU, 2013). Con el transcurso del tiempo de reacción y la presencia de iones SO4²⁻, el sulfoaluminato se enriquece en SO4²⁻ y precipita la ettringita (C3A. 3CS. 32H)(TAYLOR, 1990). Esta reacción se muestra en la siguiente ecuación:



Esta ettringita también llamada *ettringita de amasado*, recristaliza más tarde en agujas que intervienen en la cohesión del material. Cuando el yeso se consume antes de la hidratación total del C3A, la ettringita pierde SO4²⁻ y se transforma y de calcio hidratado (C3A.CS.12H) que se presenta como placas hexagonales o pesado hexagonales. Si el contenido de C3A y la cantidad de iones SO4²⁻ en la solución es suficiente para la formación de la misma, cristaliza finamente permitiendo una buena plasticidad de la mezcla (ALUJAS, 2010).

El C4AF aparentemente tiene la misma secuencia de hidratación que la correspondiente al C3A, aunque las reacciones de este compuesto son más lentas y liberan menor cantidad de calor. El C4AF no causa el fraguado instantáneo de la pasta debido a que no se hidrata lo suficientemente rápido y la presencia de yeso retarda su hidratación más drásticamente que la del C3A.

La siguiente Figura 1.1 muestra una curva calorimétrica representando el comportamiento térmico del cemento al ser hidratado.

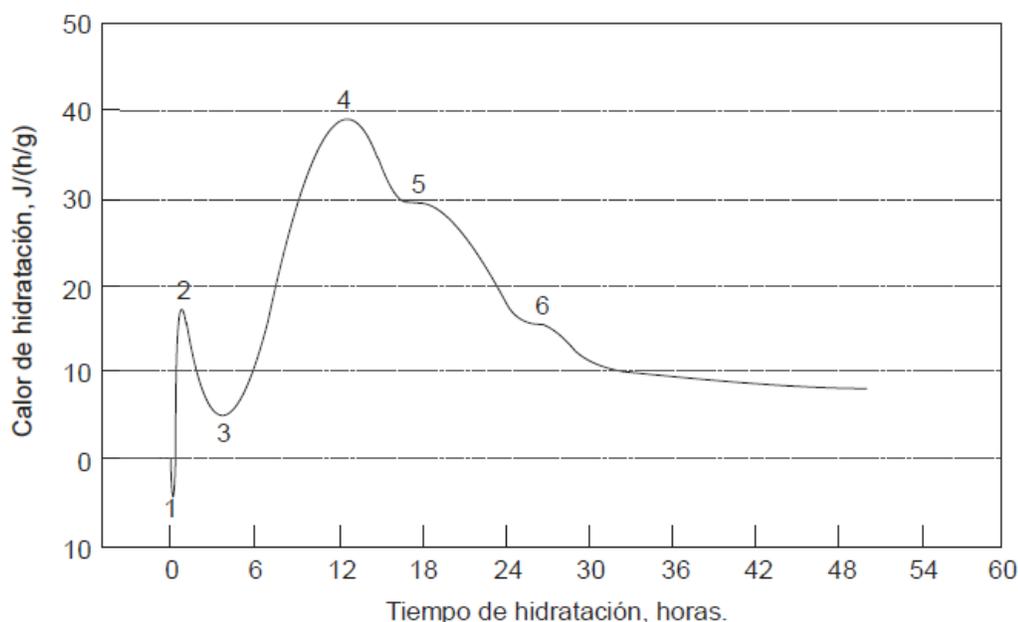


Figura 1.1 Reacciones de hidratación del CPO

Leyenda:

- 1: disolución del sulfato de potasio (K_2SO_4)
- 2: etapa de reacción temprana
- 3: período durmiente
- 4: etapa de reacción media (formación del C-S-H)
- 5: formación de la ettringita ($C_6AS_3H_{32}$)
- 6: conversión de la ettringita.

Gráfica 1 Evolución del calor de hidratación de un CP

1.4.2- La reacción puzolánica

Según (CARRASCO, 2009), las características más importantes de la reacción puzolánica son:

□ Es una reacción lenta, en consecuencia, la ganancia de resistencia de la pasta aumenta con el tiempo, por lo que se hace necesario extender el tiempo de curado para que la reacción prospere, siendo la resistencia a edades tempranas menor que la de los cementos ordinarios.

□ Es una reacción en la cual se consume el CH, reemplazándose sus cristales grandes y orientados, por pequeños, numerosos y poco orientados de CSH (Silicato de calcio hidratado).

A este efecto se lo denomina *refinamiento de grano*.

□ Los productos resultantes de la reacción precipitan en los poros capilares, transformándolos en microporos discontinuos (segmentación de poros), y en consecuencia disminuye la permeabilidad del sistema.

Dentro de los minerales arcillosos las arcillas caoliníticas poseen el mayor potencial como material puzolánico, por requerir las temperaturas más bajas para su activación y ofrece mayor reactividad. Arcillas con contenidos de hasta un 30 % de caolinita pueden ser activadas y utilizadas como puzolana con buenos resultados. La incorporación de arcillas caoliníticas calcinadas en mezclas binarias de cemento Portland a niveles de hasta el 30 % de sustitución permite incrementar o mantener las propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad.

1.5- Normativas

La normalización de cemento tiene sus inicios como especificaciones de fábrica a finales del siglo XIX, siendo en los comienzos del siglo XX cuando los organismos de normalización de los países industriales establecen normas de ensayo y calidad para los diversos tipos de cementos. Posteriormente, con la generalización de la normativa muchos países procedieron a establecer sus propias normas o bien, adoptar aquellas de mayor significación, hecho que ha obstaculizado la comparación de cementos como consecuencia de los diferentes métodos de ensayo. Actualmente, la normalización ha tendido a modificarse como consecuencia de la necesidad de adaptarse a la innovación y procurar especificaciones uniformes que permitan atender convenios de comercio internacional. (FERNANDEZ, 2006)

1.5.1- Norma Cubana

La norma cubana que rige los cementos con adiciones activas actualmente en vigor clasifica entre los grados de calidad de acuerdo al % de adición y la resistencia a compresión a los 28 días expresada en MPa (kgf/cm^2). Estos cementos denominados como PP-25, PP-35 y PZ-25 admiten de un 6 hasta un 35 % de adiciones activas naturales. Actualmente está por entrar en vigor la norma que contempla los cementos ternarios basada en los avances en las investigaciones, las pruebas industriales y semi-industriales elaboradas y que alcanzan resultados satisfactorios.

1.5.2- Norma Europea

El Comité Europeo de Normalización (CEN), fundado en 1961 en París constituye una Asociación de los Organismos Nacionales de Normalización de 19 países europeos. El objetivo específico de esta Organización Europea de Normalización, de la que España forma

parte desde su fundación, radica en la promoción del desarrollo del comercio y del intercambio entre los países miembros.

Dentro de la normativa más recientemente aprobada en España, (cabe destacar la aparición de nuevas adiciones como la puzolana natural calcinada, cenizas volantes calcáreas y esquistos calcinados, introduciendo de igual forma en los CEM II, cementos Portland con adición, dos porcentajes de sustitución, A de 6% a 20% y B de 21% a 35%, siempre para todas las adiciones admitidas, excepto para el humo de sílice en el que solo es permitido un nivel de adición A del 6% al 10%. También se establece un nivel de adición de escoria de alto horno en el cemento del 81% al 95 %, introduciéndose el cemento V/B con un porcentaje de adición de escorias del 31% al 50%, y del 31% al 50% de la suma de puzolana natural, puzolana calcinada y ceniza volante silíceas. (Ver **Anexo 1**)

1.5.3- Norma Americana

Las normas establecidas por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) en Estados Unidos, constituyen sin duda alguna los principales parámetros a seguir en cuanto a ensayos y materiales se refiere, encontrándose dentro de éstas la Norma ASTM C-595, en la cual se contemplan especificaciones básicas para cinco tipos de cementos mezclados destinados a usos generales en la construcción, determinándose en ella la calidad y tipo de materiales a emplear para el también establecido proceso de elaboración. La actual edición fue aprobada el 1º de mayo de 2014. Originalmente aprobada en 1967. Última edición previa aprobada en 2013 como C595/C595M-13. DOI: 10.1520/C0595_C0595M-14.

En la ASTM C 595 observamos las especificaciones para los cementos adicionados hidráulicos, el tipo IS cemento Portland de escoria de alto horno, tipo IP cemento puzolánico Portland, tipo P cemento Portland puzolánico para su uso cuando no se requieren mayores resistencias a edades tempranas, tipo I (PM) puzolana – modificado con cemento Portland, tipo I (SM) cemento Portland modificado con escoria, tipo S cemento de escoria para su uso en combinación con cemento Portland en la fabricación de hormigón y en combinación con cal hidratada en la fabricación de mortero de albañilería

1.6- Cementos de Bajo Carbono. Propiedades físico-mecánicas

1.6.1- Resistencia mecánica

La resistencia mecánica que es capaz de desarrollar un cemento en su función de aglomerar áridos, una vez fraguado y endurecido, es el parámetro que fundamentalmente se utiliza para determinar la calidad de ese aglomerante.

Todas las fases del cemento que hidratan pueden, potencialmente, contribuir al desarrollo de resistencias. El desarrollo de resistencias iniciales (es decir, hasta 28 días a 20 °C) está dominado por la hidratación del C3S soportado por el C3A, mientras las fases de C2S y C4AF, que hidratan más lentamente, contribuyen al desarrollo de resistencias finales.

Si bien no existe una relación entre la resistencia de los cementos y la resistencia de los hormigones elaborados con los mismos puede decirse que existe “*a priori*” una cierta vinculación: en general, un cemento de mayor resistencia permitirá obtener hormigones más resistentes. Está generalmente aceptado que la adición de puzolanas naturales y otros materiales puzolánicos, como las arcillas calcinadas, pueden incrementar la demanda de agua de pastas para una similar consistencia, debido principalmente a la forma irregular de sus granos y la alta superficie específica interna de estos materiales. Esto no afecta necesariamente la resistencia del hormigón, ya que gran parte de esta agua es absorbida por la puzolana, y no incrementa la porosidad del hormigón endurecido (MARTIRENA, 2003).(DOPICO, 2008)

Los principales factores que determinan la resistencia del hormigón son:

□ **Relación agua/cemento (a/c):** Este es uno de los factores que más puede afectar la resistencia del hormigón. La alta relación a/c permite el aumento de poros capilares, por el fenómeno de exudación, principalmente aquellos conectados con el exterior, además que se incrementa el volumen de agua ocluida en la masa de hormigón convirtiéndose más tarde en grandes poros internos del material. Esta alta porosidad disminuye la resistencia del hormigón, además de actuar negativamente en su impermeabilidad y por ende en su protección ante las acciones del medio externo (DOPICO, 2008).

□ **Condiciones de curado:** La resistencia del hormigón depende indiscutiblemente de las condiciones de curado, específicamente de la humedad y la temperatura. Cuando se interrumpe el curado húmedo, el aumento de resistencia prosigue por un corto período y luego se detiene, pero si el curado se reinicia la resistencia vuelve a incrementarse. Una evaporación excesiva de agua en el hormigón recién colocado puede retardar apreciablemente el proceso

de hidratación del cemento a edad temprana. La pérdida de agua también provoca la retracción del hormigón, generando tensiones de tracción en la superficie expuesta. Si estas tensiones se desarrollan antes que el hormigón haya alcanzado suficiente resistencia, pueden aparecer fisuras superficiales. La hidratación progresa muy lentamente cuando la temperatura del hormigón es baja, afectando desfavorablemente el desarrollo de las resistencias sobre todo a edad temprana. De aquí se deduce que el hormigón debe mantenerse protegido para mantenerlo a una temperatura adecuada para la hidratación del cemento y para evitar pérdidas de humedad durante el período inicial de endurecimiento (COL, n.d.)

□ **Tiempo de mezclado:** El mezclado del hormigón tiene por finalidad cubrir la superficie de los agregados con la pasta de cemento, produciendo una masa homogénea. En la práctica, la duración del mezclado se puede expresar ya sea en minutos o por el número de vueltas que debe realizar el tambor para producir una mezcla homogénea. Los tiempos de mezclado inferiores al minuto y medio, producen concretos de características variables. Sin embargo, a partir de los dos minutos, no se obtiene un mejoramiento de la mezcla. La resistencia es menos afectada por el tiempo de mezclado, especialmente luego de los dos minutos (MONTENEGRO, 2011)

□ **Grado de compactación y contenido de aire:** Estos dos factores están estrechamente relacionados, ya que la acción de uno influye decisivamente en el comportamiento del otro. La compactación del hormigón es la operación por medio de la cual se trata de densificar la masa, todavía blanda reduciendo a un mínimo la cantidad de vacíos. Estos vacíos en la masa se forman por varias causas, de las cuales las dos más importantes son el llamado aire atrapado, y las vacuolas producidas por la evaporación del agua de amasado. El objetivo de la compactación es eliminar la mayor cantidad posible de este indeseable aire. Los vacíos incrementan la permeabilidad que, a su vez, reduce la durabilidad. Si el hormigón no es compacto e impermeable, no será resistente al agua, ni capaz de soportar líquidos más agresivos, además de que cualquier superficie expuesta sufrirá los efectos de la intemperie y aumentará la probabilidad de que la humedad y el aire lleguen al acero de refuerzo y provoquen la corrosión. Además reducen el contacto entre el hormigón y el acero de refuerzo; por lo que no se obtendrá la adherencia requerida y el elemento reforzado no será resistente. En resumen, un hormigón completamente compacto será denso, resistente, durable e impermeable. El hormigón mal compactado será débil, poco durable, alveolado y poroso; en otras palabras bastante ineficaz (CASTILLO, n.d.)

1.6.2- Finura

La finura es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y endurecimiento. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así, que la resistencia mecánica aumenta con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento Portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. En las fases por las que el cemento pasa hasta su transformación para convertirse en pseudo-sólidos, pueden aparecer aumentos de volumen o "entumecimientos", así como reducciones conocidas como "retracciones". A partir del primer día puede tener lugar la retracción más importante de la pasta denominada "retracción de secado" y que es debida a una pérdida de agua en la pasta endurecida. De aquí la importancia de mantener un grado de humedad elevado durante los primeros días de la vida de estos materiales. Si la pasta se encuentra saturada de agua se producirá un entumecimiento. (González de la Cotera and n.d, Scrivener and Nonat, 2011)

1.8- Conclusiones parciales del capítulo

1. La reducción del factor de clínquer mediante el empleo de MCS se perfila como la alternativa con mayores perspectivas de aplicación a corto plazo para la reducción de las emisiones de CO₂. El empleo de MCS para la producción de cementos mezclados con altos volúmenes de sustitución de cemento Portland constituye una alternativa para el incremento de los volúmenes de producción de cemento necesarios para suplir la creciente demanda nacional y la mitigación del impacto ambiental de la industria de cemento cubana (Alujas, 2009).
2. La disponibilidad de las puzolanas naturales y artificiales es limitada tanto geográfica como económicamente por lo que en la actualidad no satisface la demanda asociada al sostenido incremento de la producción mundial de cemento. Las arcillas y las calizas, debido a su amplia distribución sobre la corteza terrestre y abundantes reservas constituyen una fuente atractiva de MCS.
3. Dentro de lo minerales arcillosos las arcillas caoliníticas hasta un 30% de caolinita poseen el mayor potencial como material puzolánico, por requerir las temperaturas más bajas para su activación y ofrecer mayor reactividad. Por tanto la incorporación de arcillas caoliníticas

calcinadas mezcladas permite la reducción del factor clínquer de manera que incrementa o mantiene las propiedades de resistencia a la compresión.

Capítulo II: Fabricación de cementos de bajo carbono a escala de laboratorio

2. Materiales y métodos

2.1 Generalidades

En el presente capítulo se presenta el protocolo para la elaboración de cemento LC3, con cuatro formulaciones diferentes: LC3 50(1:1), LC3 50(2:1), LC3 65(1:1) y LC3 65(2:1) y de las principales características y procesos de sus materias primas. Se presentan además los métodos de ensayos físicos-mecánicos y químicos a los cuales fueron sometidos los cementos formulados, a fin de compararlos con resultados anteriores. Los aglomerantes se obtuvieron a través de equilibrar LC2 con cemento de la fábrica de Cienfuegos. Todo esto obtenido y procesado a escala de laboratorio.

2.1.1 Diseño Experimental

El trabajo experimental se desarrolló a escala de laboratorio en el mismo se evaluaron morteros normalizados de cemento elaborados con LC3 y P-35 como referencia. Los cementos LC3 fueron elaborados con diferentes dosificaciones sustituyendo el contenido de clínquer hasta un 65% por una combinación de arcilla calcinada y caliza (poner las dosificaciones).

Declaración de las variables independientes y sus niveles.

Tabla 2.11 Variables independientes en el diseño experimental.

Variables Independientes	Niveles			
Tipo de cemento	P-35	LC ₃		
Dosificaciones de LC ³	LC ³ 50 2:1	LC ³ 50 1:1	LC ³ 65 2:1	LC ³ 65 1:1

Fuente: Elaborado por el autor.

Declaración de las variables dependientes

- Resistencia a compresión

- Tiempos de fraguado
- Reología
- Cinética de las reacciones
- Expansión
- Finura por Blaine

2.2 Procedimiento para la elaboración de los cementos

Para la elaboración de los cuatro cementos LC3, se variaron las proporciones arcilla calcinada y caliza en proporciones 1:1 y 2:1 para determinar la influencia de estos cambios sobre las propiedades físico- mecánico y químico del aglomerante.

Para ello se siguió la siguiente metodología:

- Selección y procesamiento de las materias primas utilizadas en la elaboración de los cementos.
- Caracterización del yeso, arcilla, caliza, cal y áridos empleados como materias primas.
- Obtención a escala de laboratorio de cementos con un 50 y un 65% de sustitución de clínquer equilibrando los valores de las materias primas principales y cemento Portland para la realización de los ensayos:
 - Superficie Específica (cm²/g)
 - Peso Específico (g/cm³)
 - Finura (Permeabilidad por Blaine)
 - T. Fraguado Inicial (min)
 - T. Fraguado Final (hrs.)
 - Consistencia Normal (%)
 - Expansión (mm)
 - Calorimetría Química
 - Resistencia a la compresión a los 1, 3, 7 y 28 días con arena normalizada.
 - Evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos.

2.3 Selección y caracterización de las materias primas

Los materiales empleados para la elaboración de los nuevos cementos fueron el cemento Portland, el yeso, arcilla calcinada y caliza.

2.3.1 Arcilla calcinada con adición de caliza y yeso en la formación de LC2

Como alternativa para sustituir altos volúmenes de clínquer en el cemento se utilizó la adición activa formada por la mezcla de arcilla calcinada (**Tabla 2.2**) y caliza en proporción 2:1 y 1:1. El producto de la calcinación de la arcilla proveniente del yacimiento Neptuno, ubicado en Artemisa, fue utilizado como material puzolánico.

La arcilla extraída del yacimiento fue colocada primeramente en la estufa del laboratorio de la Facultad de Construcciones durante 24 horas (**Figura 2.1c**) y luego calcinada a 800°C durante una hora en el laboratorio de Espectroscopía de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (**Figura 2.1b**). La arcilla activada térmicamente se mezcló con la caliza que también se colocó en la estufa 24h (**Figura 2.1c**) proveniente de la cantera de la fábrica de Siguaney, en proporción 2:1 y 1:1 y el yeso que representaba el 10% del total a moler (**Figura 2.1a**). La molienda de estas materias se realizó en un molino de bolas MB 800 durante 3 horas hasta alcanzar una finura entre 90 y 95%. (**Figura 2.1d**)

Tabla 2.2 Caracterización de la arcilla de “Neptuno”, Artemisa

SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	Na₂O (%)	K₂O (%)	S (%)
47.574	24.414	14.232	0.582	-0.5	-0.1	-0.5

Fuente: Elaborado por el autor



a)

60-45 % de arcilla calcinada 30-45 % de caliza blanca 10 % de yeso

b)



c)



d)

Figura 2.1 Proceso de producción del LC²

Fuente: Elaborado por el autor

2.3.2 Caliza

La caliza que se emplea en la obtención del LC3 fue suministrada por la fábrica de cementos Siguaney proveniente de la propia cantera de la entidad. La caracterización de la misma se realizó en el laboratorio de la fábrica, dichas características se muestran en la en la **Tabla 2.3**:

Tabla 2.3 Caracterización química de la caliza

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃
Por ciento (%)	4,12	1,15	0,64	51,59	1,21	40,92	92

Fuente: Elaborado por el autor

2.3.3 Cemento

El cemento utilizado en proporciones de 50 y un 65% fueron obtenidos de la fábrica Carlos Marx. La caracterización del mismo se realizó en el laboratorio de la propia entidad, la cual se muestra en la **Tabla 2.4**:

Tabla 2.4 Caracterización química del cemento P35 de la fábrica Carlos Marx

Cemento P-35																	
Días	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CL	CN	SO ₃	PPI	R.I	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fnza.	FI	EV	FF	ret 45
29/09/2015	21,73	5,02	3,12	60,66	1,24	24,1	3,05	2,02	2,20	1,51	0,41	0,59	2,30	105	0,88	3,25	23,20
Blaine	C-3	C-7	C-28	F-3	F-7	F-28	PV										
3230	28,9	35,0	44,1	5,2	6,2	8,4	1,11										

Blaine Analysis Completed 24-Sep-15 09:57:02

<u>Item</u>	<u>Value</u>
Blaine	3671 cm ² /g

Químico	Analysis	Completed
	<u>Item</u>	<u>Value</u>
	PPI	3.67 %
	RI	5.79 %
	Cal Libre	0.72
Físico	Analysis	Completed
	<u>Item</u>	<u>Value</u>
	FI	3.67 minutos
	FF	5.79 horas
	EV	0.72 mm
Mecánicos	Analysis	Completed
	<u>Item</u>	<u>Value</u>
	C-3	23.5 MPa
	C-7	31.6 MPa
	C-28	46.2 MPa

Fuente: Elaborado por la fábrica Carl Mars

2.3.4 Yeso

El yeso empleado fue suministrado por la fábrica de cemento Siguaney fue tomado en forma de roca del almacenamiento en la fábrica y provenían de Punta Alegre, y se caracterizó en el laboratorio de la misma, su composición química se muestra en la **Tabla 2.5**:

Tabla 2.5 Caracterización química del yeso

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PPI	RI
Porcentaje (%)	5,24	4,7	3,38	30,36	1,96	31,95	21,67	9,07

Fuente: Elaborado por la fábrica Carl Mars

2.3.5 Árido normalizado

La arena sílice normalizada proveniente del yacimiento de Siguaney que se encuentra localizado en la Isla de la Juventud fue la utilizada en este caso. Esta arena está formada por cuatro fracciones cuya composición química y granulométrica cumple las especificaciones de la NC 54–396:87 —Arena Sílice Normalizada Para Ensayos de Cemento.

Tabla 2.6 Características del árido normalizado

Características	U.M	Valor
Oxido de Silicio (Mín)	%	98
Pérdida por ignición (Máx)	%	0.3
Impurezas orgánicas (Máx)	%	0.6
Impurezas arcillosas y polvo (Máx)	%	0.6

Fracción No	%Retenido	Peso(g)
1	Tamiz 2mm	445
2	Tamiz 1mm	460
3	Tamiz 0,5mm	270
4	Tamiz 0,15mm	175

Fuente: NC 54–396:87

2.3.6 Agua

En este caso se siguió *NC 353 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros – Especificaciones* con la utilización de agua potable del servicio público.

2.4 Protocolo de molienda y obtención de los cementos

Para la producción del LC2 se realizó la inter-molienda de los materiales, cada uno fue molido durante el tiempo determinado para la obtención de la finura requerida entre 90 y 95%.

Primero se molieron 60kg en 2 amasadas cada una de 30kg correspondientes a la capacidad de nuestro molino MB-800 que desarrolla un mecanismo de impacto y desgaste, con el cual se pueden lograr partículas con tamaño de 10 μ m, para posteriormente mezclar

- Caliza se realizó dos amasadas de 8.4Kg y 6.3Kg con 30 minutos cada uno.
- Arcilla calcinadas + Caliza + Yeso se realizó la molienda de 2 amasadas de 14 Kg cada una dándole un tiempo de duración de 2 horas.

Una vez ya obtenido el LC2 2:1 y 1:1 se procede a determinar si cumple tanto por resistencia por la NC 506:2013 *Determinación de la resistencia mecánica* y finura por la NC 980:2013 *Determinación de la finura y la superficie específica*. En el caso del LC² 1:1 no cumplió con la finura por tamizado por lo q se molió 2h mas. Luego de procedió a la homogenización del LC2 obtenido con el CPO de Cienfuegos en la mezcladora (**Figura 2.2**)

En este caso la adecuada homogenización de los LC³ será una variable de incertidumbre que puede afectar las características físico-mecánicas.



50-65 % de cemento

50-35 % de LC²

LC3 50 2:1 y 1:1, LC3 65 2:1 y 1:1

Figura 2.2 *Formulación y obtención del LC³.*

Fuente: Elaborado por el autor

2.4.1 Ajuste de sulfatos

Debido a las condiciones tecnológicas del proceso de producción de los aglomerantes no se pudo realizar los ajustes de sulfatos por el ensayo de calorimetría. El ajuste de los sulfatos consiste en tratar de equilibrar la proporción de yeso utilizada en la elaboración del LC² con el yeso que contiene el cemento proporcionado por la fábrica de Cienfuegos. Por consiguiente teniendo en cuenta que en el cemento debe quedar contenido entre un 2,5 y 3,5% de SO₃, se tomó el valor medio de 3%.

Luego para cada cemento se obtuvieron las formulaciones de LC² que se presentan en la **Tabla 2.7b** y las formulaciones del LC³ en la **Tabla 2.7a**:

Tabla 2.7 Formulaciones del LC² y LC³

Materias Primas	LC ² (2:1)	LC ² (1:1)
Arcilla calcinada	60%	50%
Carbonato de Calcio	30%	50%
Yeso	10%	10%

a)

Materias Primas	LC3 50(2:1)	LC3 50(1:1)	LC3 65(2:1)	LC3 65(1:1)
LC2	50%	50%	35%	35%
Cemento	50%	50%	65%	65%

b)

Fuente: Elaborado por el autor

Por lo tanto las proporciones resultantes de los cementos según las cantidades necesitadas (**Tabla 2.8**) fueron:

Tabla 2.7 Proporciones en Kg del LC³

Proporciones	LC3 50 (2:1)	LC3 50 (1:1)	LC3 65 (2:1)	LC3 65 (1:1)
LC2	7.5 kg	7.5 kg	5.25 kg	5.25 kg
P-35	7.5 kg	7.5 kg	9.75 kg	9.75 kg

Fuente: Elaborado por el autor

Estas formulaciones fueron comprobadas con la realización del ensayo de tiempo de fraguado.

2.5 Ensayos para la caracterización del cemento

2.5.1 Peso Específico (g/cm³) por Blaine

El ensayo se realiza según lo establecido en la norma cubana *NC 980:2013 Determinación de la finura y la superficie específica* y *NC 523:2015 Determinación de la densidad*. Primeramente se halla la densidad mediante el frasco de Le Chatelier vertiendo aproximadamente 64g de cada cemento, y la diferencia entre la lectura inicial y final representa el volumen de líquido desplazado por la masa de cemento usado. Este parámetro es de utilidad para el diseño y control en las mezclas de hormigón. En la determinación de la densidad, serán usados kerosén

libre de agua, o nafta, que tienen una densidad mayor que 0,73 g/mL a 23 ° C ± 2° C (Figura 2.3a). Y luego por el método de Blaine se mide la superficie específica (masa referida a la superficie) por comparación con una muestra de cemento de referencia. La determinación de la superficie específica sirve principalmente para comprobar la uniformidad del proceso de molienda de una sola y misma planta. Este método solo permite un juicio limitado sobre las propiedades del cemento utilizado. El método consiste esencialmente en medir la pasar a través de una capa compactada de cemento de dimensiones y porosidad especificadas. (Figura 2.3b)

Tabla 2.9 Resultados de Superficie Específica y Peso Específico.

Ensayos	LC3 50(2:1)	LC3 50(1:1)	LC3 65(2:1)	LC3 65(1:1)	P-35
Superficie Específica (cm ² /g)	6047	7767	5096	5696	3671
Peso Específico (g /cm ³)	287	287	296	295	296

Fuente: Elaborado por el autor



a)

b)

Figura 2.3 Ensayos de Peso Específico y Superficie Específica.

Fuente: Elaborado por el autor

2.5.2 Finura (Por Tamizado)

Para la determinación de este parámetro se utilizó el método descrito en la norma cubana *NC 980:2013 Determinación de la finura y la superficie específica*. El tamiz debe tener un bastidor cilíndrico, rígido, resistente, no corregible, de 150 mm a 200 mm de diámetro nominal y de 40 mm a 100 mm de espesor, y con el fondo formado por una malla metálica de 90 μm , por ejemplo, de abertura de alambre de acero inoxidable u otro alambre resistente a la abrasión y no corrosible.

Primeramente el cemento a ensayar se sacude durante dos minutos en un recipiente cerrado se espera dos minutos, se pesan $25 \pm 0,5$ g de cemento se coloca en el tamiz cerrado con una bandeja debajo, este procedimiento dos veces para obtener un R1 y R2, y en el caso que estos valores difieran en un 1% se realiza un tercer tamizado.

2.5.3 Determinación del fraguado inicial y final

La determinación de los tiempos de fraguado se realizó según lo establecido en la **NC 524: 2015** Cemento hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la consistencia y tiempos de fraguado por aguja de Vicat. De manera general para obtener los tiempos de fraguado inicial y final es necesario primeramente realizar el ensayo de consistencia normal ya que con este se determina la cantidad de agua o para preparar la pasta de cemento hidráulico a ensayar, para ello se utilizaron 650g de cada cemento.

La muestra de ensayo utilizada en la determinación de la consistencia normal puede ser usada para la determinación adicional del tiempo de fraguado por aguja Vicat. Inmediatamente después del moldeo, ponga la muestra de ensayo dentro de la cámara o local húmedo y manténgala allí excepto cuando se está realizando una determinación del tiempo de fraguado. Para la realización del ensayo es necesaria la preparación de la probeta de pasta, el molde cónico con la pasta en su interior y la placa de apoyo se colocaran dentro de la cámara o local húmedo y manténgala allí excepto cuando se está realizando una determinación del tiempo de fraguado, se considerara que alcanza el fraguado inicial hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos y el tiempo de fraguado final es cuando la aguja no se hunde visiblemente dentro de la pasta. (Figura 2.4)

Tabla 2.10 *Tiempos de fraguado inicial y final y consistencia normal*

Cementos	Tiempo de fraguado (min)	de inicial	Tiempo de fraguado (horas)	de final	Consistencia Normal (%)
LC3 50 (2:1)	35		1		35.5
LC3 50 (1:1)	40		1.33		35
LC3 65 (2:1)	40		1.58		33.5
LC3 65 (1:1)	40		2		33

Fuente: Elaborado por el autor



Figura 2.4 *Ensayo de Consistencia normal y Aguja de Vicat*

Fuente: Elaborado por el autor

2.5.4 Ensayo de resistencia mecánica

La resistencia mecánica del cemento es esencial para determinar el aporte verdadero del cemento por lo que el necesario la utilización de árido normalizado y una relación de agua-cemento de 0.5 según la *NC 506:2013 Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la resistencia mecánica*. El total de probetas realizadas fue de 20 en edades de 1, 3, 7, y 28 de las cuatro formulaciones y de la muestra patrón que en este caso fue el CP-35 de Cienfuegos se utilizó una proporción de arena normalizada de 1350 ± 5 g. Antes de elaborar las probetas, se limpiaron y engrasaron los moldes a utilizar de acuerdo con los requerimientos. El molde dispondrá de tres compartimentos horizontales, de forma que se puedan preparar simultáneamente tres probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm de sección transversal y 160 mm de longitud, **1** Las probetas serán moldeadas inmediatamente después de la preparación del mortero.

Preparación del mortero: Cada amasada para tres probetas estará compuesta de $450 \text{ g} \pm 2$ g de cemento, $1350 \text{ g} \pm 5$ g de arena y $225 \text{ g} \pm 1$ g de agua, primeramente se vertió el cemento en la mezcladora, a los 10 segundos se le adicionó el agua, luego a los 30 segundos se vertió la arena. Luego 60 segundos a una velocidad lenta. Seguidamente se mezcló durante 30 segundos a una velocidad rápida. Se detuvo la mezcladora durante 90 segundos, utilizando los primeros 15 para separar el mortero adherido en las paredes y el tiempo restante debe permanecer en reposo. Por último se puso en marcha nuevamente la mezcladora durante 60 segundos a la velocidad rápida. (**Figura 2.5**)



Figura 2.5 Amasadora Planetaria

Fuente: Elaborado por el autor

Enmoldado y compactación:

Cada molde antes de ser utilizado debe estar limpio y engrasado (Figura 2.6a). El llenado de los moldes se realiza por dos capas compactadas cada una con 60 golpes en la mesa de compactación, (Figura 2.6 b) luego se retira la tolva y se engrasa cada briqueta.



a)



b)

Figura 2.6 Enmoldado y compactación

Fuente: Elaborado por el autor

Conservación y curado de las probetas:

Las probetas estuvieron a una temperatura aproximada de $23 \pm 1,7$ °C durante 24h, después se desencofraron y fueron sumergidas en agua hasta las respectivas edades.

Ensayo de las Probetas

Para la determinación de la resistencia mecánica utilizar el método de carga concentrada y centrada por medio del equipo especificado en este caso la prensa Caenao BCCCP (1975) (**Figura 2.7a**). Primeramente se coloca el prisma en el dispositivo de flexión, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes y aplicar la carga verticalmente por los rodillos. En este caso no era necesario procesar la flexión, pero las mitades fueron obtenidas por este proceso. (**Figura 2.7b**)

Luego los ensayos de resistencia a compresión se realizarán sobre las dos mitades del prisma roto y en este caso es importante mantener las dos mitades del prisma húmedas hasta el ensayo de compresión. Centrar cada semi - prisma lateralmente con relación a los platos de la máquina a $\pm 0,5$ mm y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm (**Figura 2.7c**). Aumentar la carga uniformemente a una velocidad de $2\ 400\ \text{N} \pm 200\ \text{N/s}$ durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura y en este caso que el incremento de carga se regula a mano se debe reducir la velocidad en las proximidades de la carga de rotura. Y calcular la resistencia a compresión por la siguiente formula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{donde:}$$

R_c : Resistencia a compresión (MPa);

F_c : Carga máxima de rotura (N)

1600 = (40 x 40) mm² es la superficie de los platos o placas auxiliares

1 N/mm² = 1MPa

Tabla 2.11 Resistencia a compresión

Disificaciones/Edades	1 d	3d	7d	28d
P-35	7.29	17.6	28.7	34.7
LC3 50(2:1)	7.84	10.1	24.5	23.39
LC3 50(2:1)	12.5	28.3	36.3	41.53
LC3 65(2:1)	12.3	29.7	39.3	48.41
LC3 65(1:1)	7.68	26.3	30.1	46.48

Fuente: Elaborado por el autor



a)



b)

c)

Figura 2.7 Prensa Caena de flexo-tracción y compresión

Fuente: Elaborado por el autor

2.6 Ensayos en pastas de cemento

2.6.1 Minicono

Para el desarrollo del ensayo es necesario consultar la norma cubana *NC 235:2005 Pastas de cemento-Determinación de la plasticidad y su variación en el tiempo por el método del Minicono*. La determinación de la plasticidad, su variación en el tiempo y la reducción de agua de las pastas de cemento están basadas en la medición del área de esparcimiento alcanzada como consecuencia de la caída por gravedad al retirar el cono de Abraham que la contiene.

Para la realización del ensayo se tomaron 100g de cemento y 50g de agua manteniendo la relación de 0,5 mezclándolo la pasta a 250 r.p.m., la pasta es vertida en el Minicono durante 1 minuto levantándola verticalmente.

Tabla 2.11 Resultados del Minicono en mm

Cementos	mm
P-35	78.67
LC3 50 2:1	44
LC3 50 1:1	43.08
LC3 65 2:1	46.5
LC3 65 1:1	45.5

Fuente: Elaborado por el autor

2.6.2 Calorimetría Isotérmica

El ensayo se basa en la medición de la velocidad de liberación de calor en función del tiempo bajo un régimen isotérmico y aprovecha el carácter altamente exotérmico de las reacciones de hidratación del CPO y de la reacción puzolánica y su cinética relativamente lenta. De esta forma, la cantidad de calor total liberado para un momento dado es directamente proporcional a la cantidad de productos de hidratación generados hasta ese momento, y puede tomarse como una medida del grado de reacción alcanzado por el sistema. La medida del calor total desarrollado y la velocidad o flujo de calor obtenidos por este método proveen información acerca de la cinética de hidratación, grado de hidratación, mecanismo de hidratación etc., por lo que es una técnica que encuentra aplicaciones extensivas en el estudio de las reacciones de hidratación del CPO y de las puzolanas (Alonso and Palomo, 2001).



Figura 2.8 Calorímetro TamAirde

Fuente: Elaborado por el autor

El ensayo de calorimetría isotérmica fue realizado en las pastas de los cementos con sustituciones de arcilla calcinada y caliza a una relación agua/cemento de 0,42. Las pastas fueron mezcladas a 1600 rpm durante 2 minutos, y el ensayo se realizó en un calorímetro TamAirde la firma Thermometric con 8 canales. Primeramente el equipo se calibró para una escala de 600 mW, a una temperatura de 30°C. El agua utilizada para la realización del ensayo era destilada y fue utilizada como referencia para cada una de las muestras y lecturas cada 30 segundos durante 5 días fueron tomadas usando un ordenador conectado al equipo.

2.7 Conclusiones parciales

1. Se elaboraron cuatro dosificaciones de cementos LC3 en los que se variaron las cantidades de sustitución del clínquer (50 y 65) y la composición de arcilla calcinada y caliza en proporción 2:1 y 1:1, para determinar la influencia de estos cambios sobre las propiedades físico- mecánicas.
2. El uso de la adición activa formada por la mezcla de arcilla calcinada y caliza en dos proporciones 2:1 y 1:1, constituyó un elemento importante para comparar la influencia de estas en el resultado final del aglomerante.

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE CEMENTOS DE BAJO CARBONO

3. Generalidades

En el presente capítulo se exponen los resultados de la evaluación de los aglomerantes con 50 y 65% de sustitución de clínquer por arcilla calcinada y caliza en proporción 2:1 y 1:1, cuya producción a escala de laboratorio se realizó en la Fábrica de Cementos Siguaney.

3.1. Análisis de los resultados de los cementos

A partir de los aglomerantes propuestos obtenidos de aplicar el procedimiento descrito en el capítulo 2, se realizan los ensayos establecidos en la NC 96:2011, además de ser comparados con un cemento PP-35 tomado como referencia; cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.1 a continuación.

Tabla 3.1: Ensayos físicos de los cementos obtenidos con arcilla calcinada a escala de laboratorio.

Ensayos	LC3 50(2:1)	LC3 50(1:1)	LC3 65(2:1)	LC3 65(1:1)	P-35
Superficie Específica (cm ² /g)	6847	7767	5096	5696	3671
Peso Específico (g /cm ³)	287	287	296	295	--
T. Fraguado Inicial(min)	40	35	40	40	
T. Fraguado Final(hrs)	1.3	1	2	1.58	5.79
Consistencia Normal (%)	35.5	35	33.5	33	26

Fuente: Elaborado por el autor

Superficie específica (cm²/g)

La Superficie específica se evalúa utilizando el método Blaine, a través del Permiabilímetro; este método no resulta ideal para evaluar este parámetro en el caso de los cementos mezclados con arcillas calcinadas, ya que no considera la superficie que aportan las arcillas de morfología irregular. Aunque en general los resultados coinciden ya que se evidencia que los valores de superficie específica de los cementos LC³ es elevada en comparación con el

cemento por el hecho de que están conformados por la combinación de arcilla calcinada-caliza, materiales de una superficie específica elevada.

Los resultados muestran que los LC³ 50 poseen valores superiores de la superficie específica en comparación con los LC³ 65 y esto a su vez incide en la demanda de agua del sistema.

Según Vizcaíno, 2014 aparentemente el clínquer, considerado el material más duro, actúa como agente de molienda, y provoca la sobre-molienda de los materiales más blandos (piedra caliza y arcilla calcinada). Aplicado a la forma en la que se formuló los cementos LC³ a partir del LC², podemos decir que en el caso el material blando fue la arcilla y el yeso fueron refinados por el material más duro, mientras la caliza, permanece como una fracción medianamente gruesa.

Tiempo de Fraguado Inicial y final

Los resultados obtenidos del tiempo de fraguado no cumplen con los rangos establecidos por las normas cubanas NC 96 2011. Esto se considera consecuencia de un mal ajuste de sulfatos, debido al alto contenido de alúmina presente en los cementos ternarios, el contenido de sulfatos debe ser ajustado de acuerdo con el nivel de adición de cada mezcla, para garantizar tiempos de fraguado acordes a los rangos establecidos.

El contenido de sulfatos del sistema tiene que garantizar la hidratación controlada de la cantidad extra de aluminatos suministrados por la arcilla calcinada. También en este caso hay que tener en cuenta la finura del material que incide directamente tanto en el fraguado inicial como el final.

Realmente al comparar las cuatro formulaciones de cementos LC³ ninguno cumplen con las exigencias, aunque las de mejor comportamiento del tiempo de fraguado los cementos LC3 65(2:1) y LC3 65(1:1)

Consistencia Normal (%)

Los resultados de consistencia normal resultan alejados P35 y bastante similares entre las diferentes formulaciones de LC³ 50 y LC³ 65, lo cual evidencia una mayor demanda de agua consecuencia de los procesos de molienda y de superficie específica que poseen. Esta demanda de agua trae consigo el aumento de la porosidad que podría reducirse con el tiempo producto de la reacción del HC con la alúmina y la sílice aportada por la arcilla calcinada y también el aumento de la resistencia a compresión, y estos a su vez traen consigo la reducción

del tamaño de los poros capilares y la interconexión de estos, debido a la formación de SCH adicional de la reacción puzolánica, facilitando así mayor impermeabilidad.

Como se comentó antes, se considera que una alta superficie específica de los constituyentes y del cemento puede ser ventajosa en ocasiones, por lo tanto se recomienda estudiar con mayor profundidad los efectos de la misma en la demanda de agua necesaria para lograr las consistencias normales y evitar sus efectos negativos.

3.1.2 Ensayos de resistencia mecánica de morteros fabricados con cementos ternarios

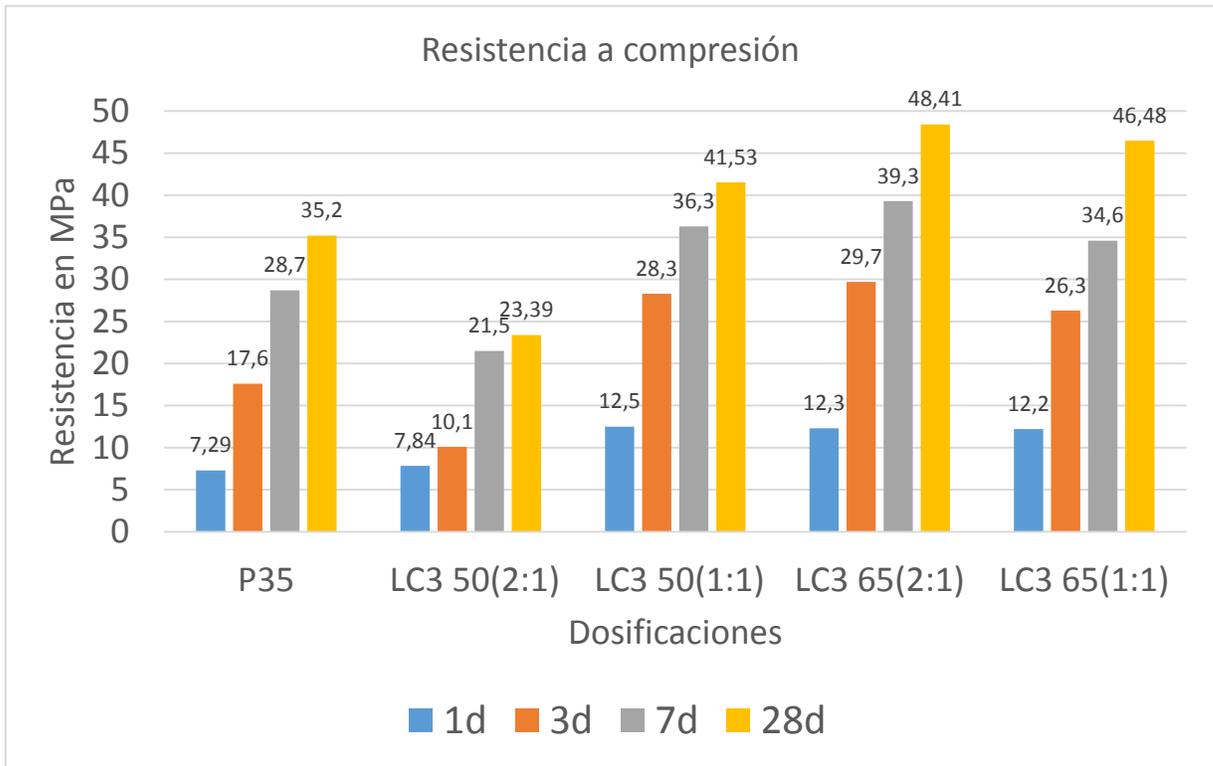


Figura 3.1: Gráfico de la resistencia a compresión de los cementos evaluados.

Fuente: Elaborado por el autor

En la figura 3.3 se observa que los cementos todos los cementos exceptuando el LC³50 2:1 cumple con las especificaciones de la NC 96:2011 para todas las edades.

Al comparar ambos cementos entre sí se puede apreciar que el LC³ 65 presenta un mejor comportamiento en cuanto a resistencia mecánica y una mejor resistencia inicial que las formulaciones de LC³ 50.

Para comparar el comportamiento de las resistencias mecánicas en el tiempo de los cementos mezclados se puede observar la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Comportamiento de la resistencia en el tiempo de los cementos analizados

Disificaciones/Edades	1 d	3d	%	7d	%	28d	%
P-35	7.29	17.6	50.3	28.7	82.0	35.2	100
LC3 50(2:1)	7.84	10.1	28.9	24.5	70.0	23.39	67
LC3 50(1:1)	12.5	28.3	80.9	36.3	100.0	41.53	100
LC3 65(2:1)	12.3	29.7	84.9	39.3	100.0	48.41	100
LC3 65(1:1)	7.68	26.3	75.1	30.1	86.0	46.48	100
NC 95:2011		17	48.6	25	71.4	35	100

Fuente: Elaborado por el autor

En esta tabla se puede observar las resistencias que alcanzan las diferentes dosificaciones a lo largo del tiempo, destacable son las LC³ 65 2:1 y la LC³ 50 1:1, ya que desde 7 días alcanza la resistencia máxima deseada. Es evidente también que las formulaciones LC³ alcanzan resistencia en un periodo bastante rápido exceptuando la LC³ 50 2:1 debido a las altas finuras que poseen.

3.1.3 Comparación entre los resultados de la resistencia a compresión de los cementos SIG B-45, 2015 y 2017.

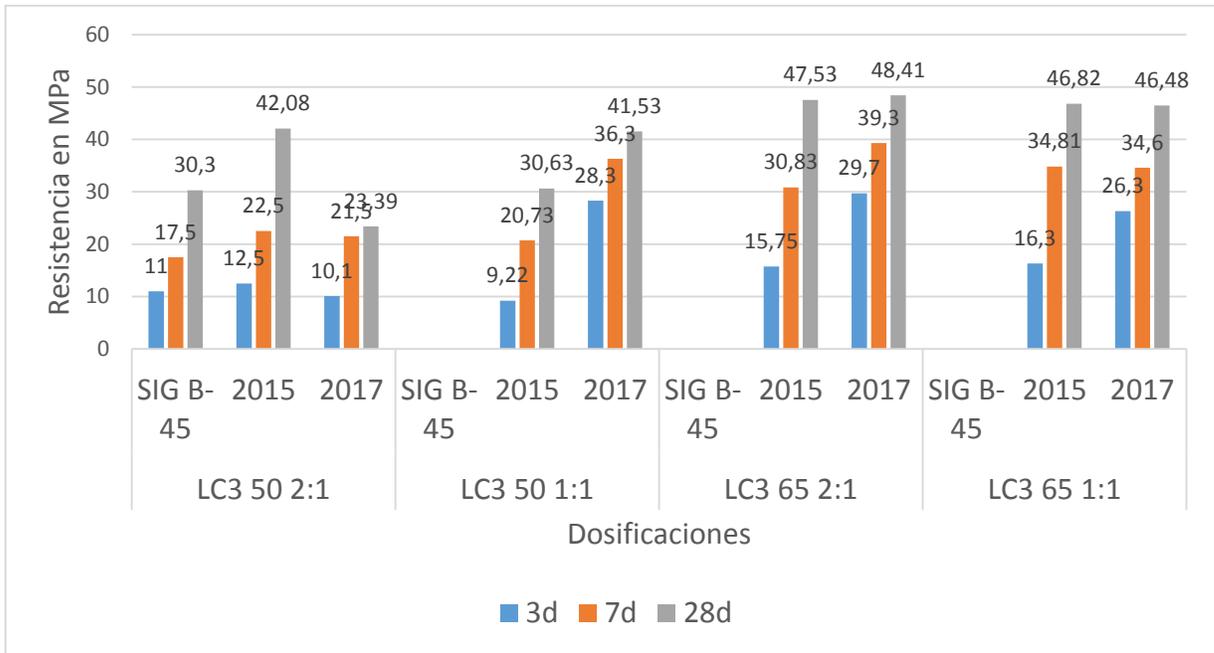


Figura 3.2 Comparación de las resistencia de otros estudios

Fuente: Elaborado por el autor

Los mejores resultados en resistencia se obtuvieron en el 2017, exceptuando para el LC³ 50 2:1 con el 2015 debido a la alta superficie específica que poseía esta formulación. Ya que las diferencias con SIG B-45 reside en el hecho de que se obtuvo un cemento Pz-25 debido el exceso de sulfatos en el sistema y la baja finura, causada por la naturaleza multicomponente de los cementos mezclados

3.2 Análisis de los resultados en pastas

3.2.1 Ensayo del Minicono

Para determinar las propiedades reológicas en las pastas de cemento con el objetivo principal de determinar su laborabilidad se utiliza el ensayo del Minicono, el cual se realizó a las muestras de cemento LC3 50(1:1), LC3 50(2:1), LC3 65(1:1), LC3 65(2:1) tomando como patrón de referencia el cemento P-35.

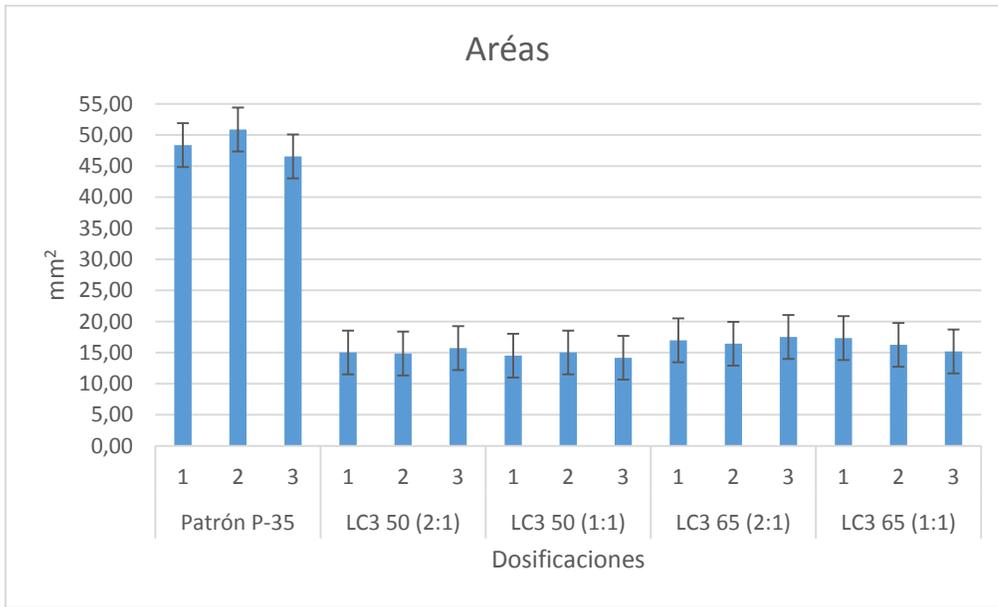


Figura 3.2 Áreas promedio para cada pasta de cada formulación.

Fuente: Elaborado por el autor

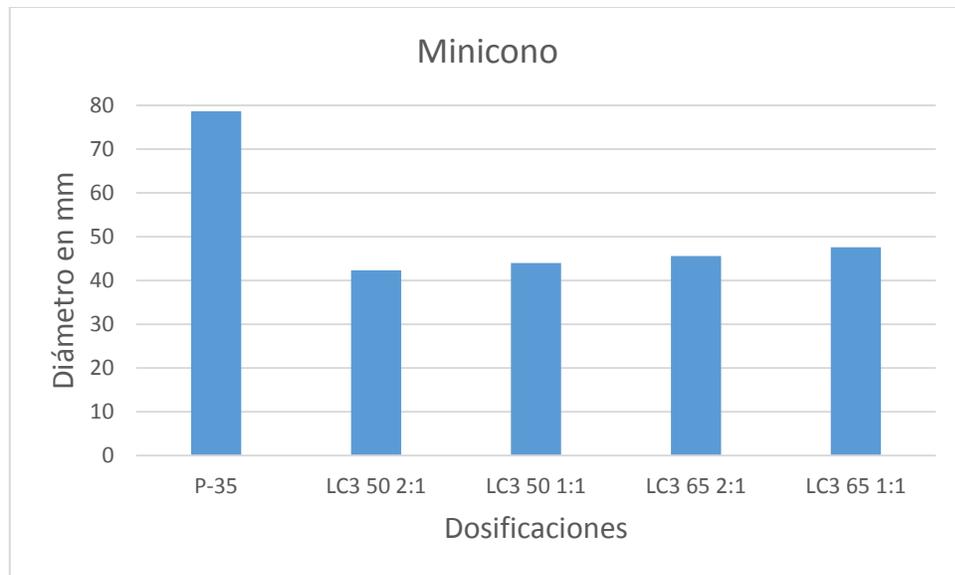


Figura 3.6: Gráfico del comportamiento de la reología de las pastas de cementos.

Fuente: Elaborado por el autor

Como se observa en la **Figura 3.6** las pastillas de referencia de P35 tienen mayor área de esparcimiento que las pastillas de los otros aglomerantes, esto pudiera estar dado por la presencia en los cementos elaborados de la mezcla arcilla calcinada-caliza ya que como se mencionó anteriormente, las mismas aportan una gran superficie específica a los cementos en estudio y por lo tanto demandan mayor cantidad de agua lo cual tiene un efecto negativo en la reología.

En estos casos se evidencia la influencia de la elevada superficie específica de los cementos LC³ en el que los aun con proporciones menores de arcilla asemejaban su comportamiento tanto los LC³ 50 y los LC³ 65 ya que las proporciones 1:1 de cada dosificación poseían una superficie específica menor.

3.2.2 Calorimetría Isotérmica

Para todos los cementos LC³ el periodo de inducción se acorta en comparación con el cemento P-35 y se incrementa en general la velocidad de hidratación asociada a la reacción principal de los silicatos. Todos los cementos LC³ presentan un comportamiento similar, caracterizándose en todos los casos por la extensión en el tiempo de las reacciones principales de los silicatos y aluminatos y un incremento significativo de en el pico asociado a la formación secundaria de ettringita, lo cual se atribuye a la gran cantidad de alúminas reactivas por la presencia de arcillas calcinadas.

En todos los casos la alta intensidad del pico está asociada a la formación secundaria de ettringita y su aparición antes de las 12h, lo cual indica una no adecuada sulfatación del sistema.

Otro factor que muestra una alta influencia en los altos valores de calor libre por gramos de cemento es la alta finura de las formulaciones de cemento.

Para los sistemas LC³ 65 también se observa un marcado incremento del calor asociado a la formación de fases AFM, fenómeno que ocurre entre las 40 y 50 h.

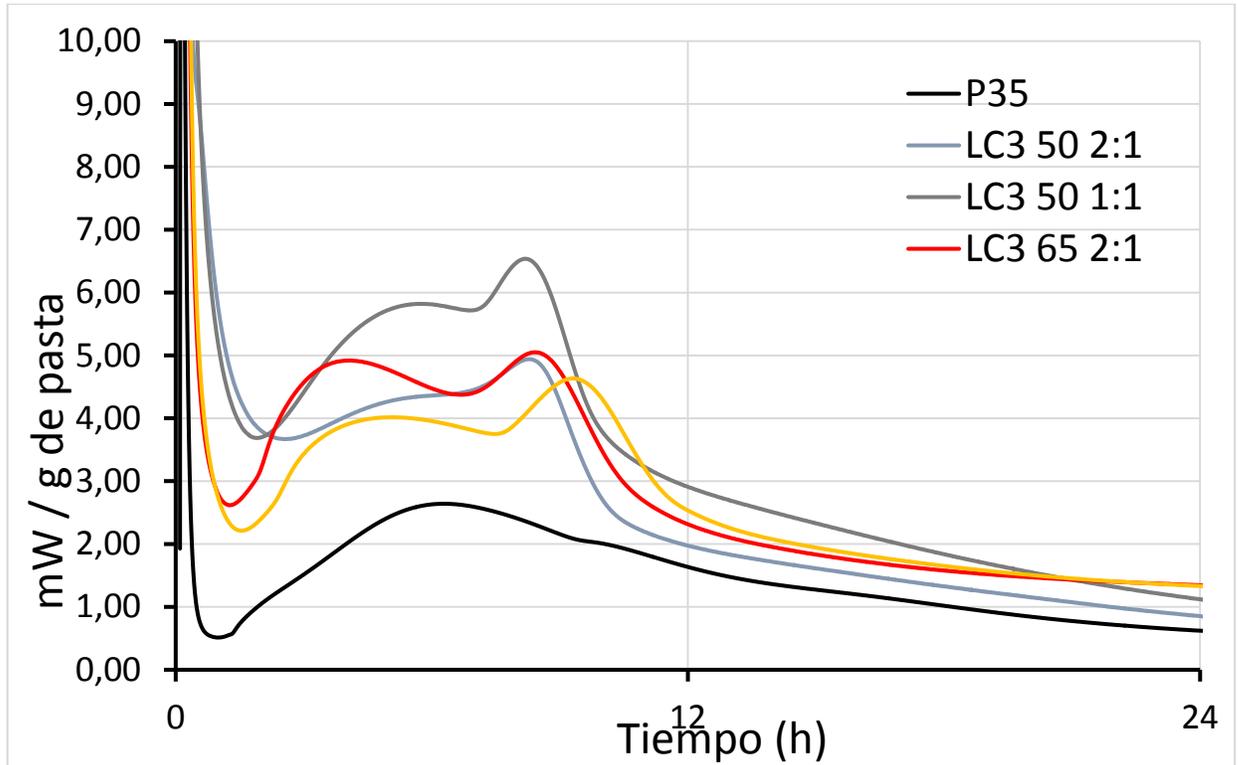


Figura 3.7: *Cinética de las reacciones*

Fuente: Elaborado por el autor

Se observa que los valores totales acumulados por gramos de cemento P-35 se asocian a la reacción puzolánica como al efecto filler. Se observa una correlación directa entre la finura de los cementos y los valores de calor acumulado.

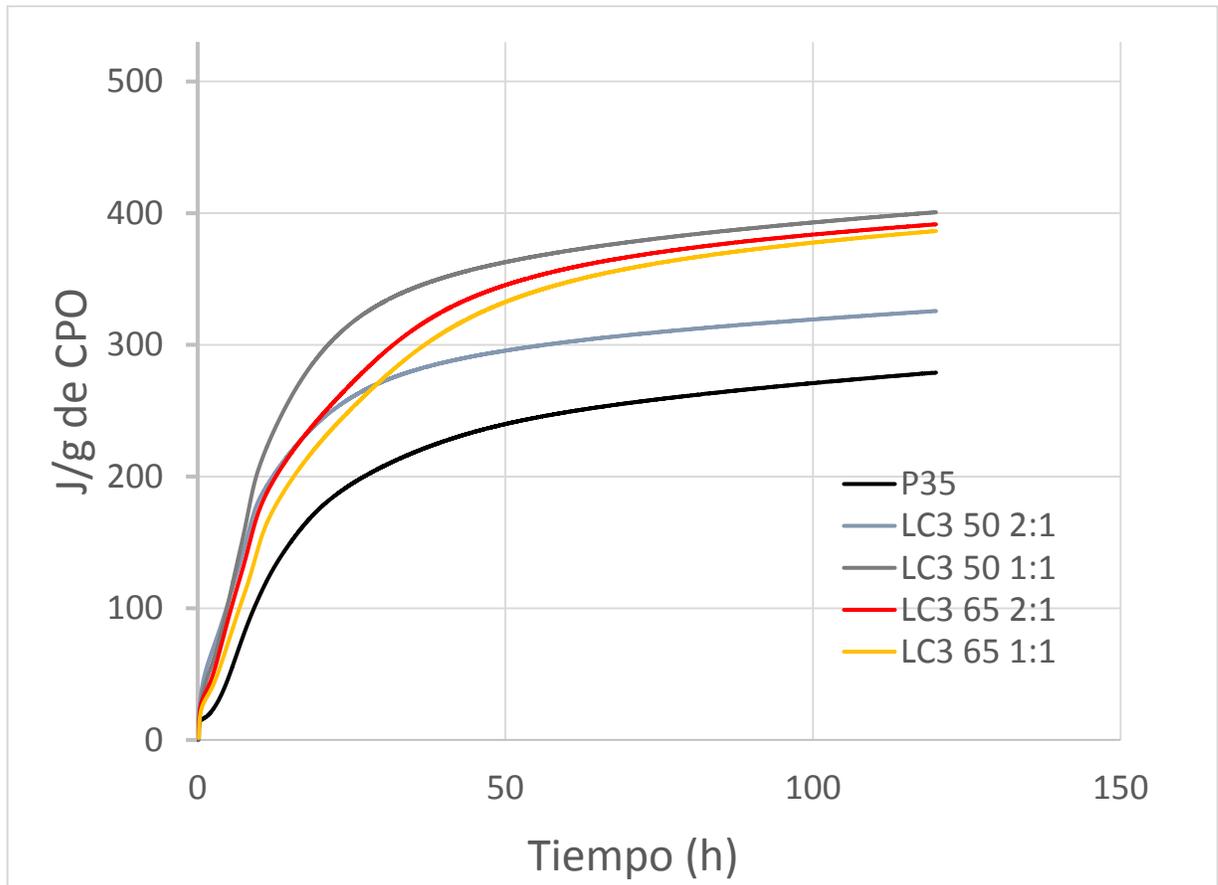


Figura 3.8: Calor de hidratación acumulados

Fuente: Elaborado por el autor

CONCLUSIONES

1. Las nuevas formulaciones de sistemas ternarios con arcillas calcinadas y caliza tienen gran potencial en términos de resistencia para proporciones de mezclas específicas, aportando con su empleo la mejora de propiedades físico-mecánicas en morteros. Ya que la resistencia en las formulaciones de LC³ 65 superan hasta un 30% las resistencias deseadas. A su vez, representan un beneficio económico debido a los niveles de productividad alcanzados en cuanto a los % de sustitución de clínquer.
2. De forma general los cementos mezclados cumplen en su mayoría con la NC 96:2011 internacionales en cuanto a resistencia a compresión, a la edad de 28 días, exceptuando el LC3 50 (2:1) y siendo el LC3-65 en ambas formulaciones el de resultados más representativos. Aunque en los ensayos físicos en este caso la aguja de Vicat los tiempos obtenidos no cumplen con la norma debido a las altas finuras obtenidas.
3. La cinética de las reacciones por medio del ensayo de Calorimetría Isotérmica evidencia la no adecuada sulfatación del sistema por lo que no pueden controlar la reacción de los aluminatos a partir de la arcilla.

RECOMENDACIONES

1. Indagar en el estudio de la demanda de agua en cementos ternarios con adición arcilla calcinada-carbonato de calcio.
2. Evaluar el efecto de la intermolienda en la composición granulométrica en cada una de las materias primas del cemento.
3. Evaluar las propiedades de los cementos en hormigones tomando como referencia los cementos que obtuvieron resultados satisfactorios.

Bibliografía

ACI, 2001. *Use of raw or processed natural pozzolans in concretes*, s.l.: s.n.

ALUJAS, A., 2010. *Obtención de un material puzlánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*, s.l.: Tesis para optar por el título de doctor en Ciencias.

ASTM, 2000. *c 959*, s.l.: s.n.

BAPAT, J., 2012. *Metakaolin, in Mineral Admixtures in Cement and Concrete.*, s.l.: s.n.

BETANCOURT RODRIGUEZ, S., 1997. *Estudio teórico experimental de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña.*, s.l.: Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas.

CARRASCO, M. F., 2009. . *Materiales cementicios.*, Santa Fe, Argentina: s.n.

CASTILLO, J. L., s.d. *Monografía. Compactación.* , s.l.: [Online]. Available: Monografias.com.htm.

CASTILLO, R., 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolínica de baja pureza.*, s.l.: s.n.

CEN, E. 1.-1., 2011. s.l.: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity.

COL, s.d. *Curado del hormigón.*, s.l.: Available: http://www.icpa.org.ar/publico/files/curado_del_hormigon.pdf.

CSI, 2010. *Cement Industry Energy and CO2 Performance "Getting the Numbers Right"*, s.l.: World Bulliness Council for Sustainable Development.

CSI-WBCSD, I., 2009. *A Sectoral Approach. Greenhouse gas mitigation in the cement industry*, s.l.: The Cement Sustainable Initiative and World Business Council for Sustainable Development www.wbcdcement.org.

DAMTOFT, J., 2008. *Sustainable development and climate change initiatives.* , s.l.: Cement and Concrete Research.

DANNER, T., 2013. *Reactivity of calcined clays, in Faculty of Natural Sciences and Technology*, s.l.: s.n.

- DAY, R., 1992. *Pozzolans for use in low-cost housing. A state of the art report, I.D.R.*, Canada: s.n.
- DOPICO, J. & M. J. F., 2008. *Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario.*, s.l.: s.n.
- EPFL DOCTORAL COUSE-SUPPLEMENTARY CEMENTICIOUS MATERIALS. LAUSANNE, S., 2010. *Supplementary cementitious materials. Sources, production, composition and combustion science*, s.l.: s.n.
- ESCALONA, C. R., 2011. *Evolución de los parámetros químicos-físicos del sistema (Clinker-Metacaolín-Carbonato de Calcio-Yeso) a edades tempranas*, s.l.: s.n.
- FERNANDEZ, L., 2013. *Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínquer a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- FERNANDEZ, O. R., 2006. *Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos.*, s.l.: s.n.
- FERNANDEZ, R. , M. A. S. K., 2011. . *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite*, s.l.: s.n.
- HENDRIKS, C., 1998. *Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry*, s.l.: Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technoges.
- HOOKE, M., 2008. *A supply-driven forecast for the future global coal production.*, s.l.: ASPO.
- LAWRENCE, B., 2005. *Mineral admixtures in mortars effect of type amount and fineness of fine constituents on compressive strength*, s.l.: Cement and Concrete Research.
- LOTHENBACH, 2008. *Influence of limestone on the hydration of Portland cements*, s.l.: Cement and Concrete Research.
- MARTINEZ, L. M., 2014. *ALTERNATIVAS DE CEMENTOS NACIONALES PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO*, s.l.: s.n.
- MARTIRENA, J. F., 2003. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa.*, s.l.: s.n.

- MASSAZZA, 1993. *Pozzolanic cements. Cement and Concrete Composites*, 15, 185-214., s.l.: s.n.
- MENENDEZ, G. V. B. A. E. I., 2003. *Strength development of ternary blended cement with limestone containing natural pozzolana and limestone blended cements*, s.l.: Cement and Concrete Composites.
- MEYER, C., 2009. *The greening of the concrete industry. Cement & Concrete Composites*, s.l.: s.n.
- MONTENEGRO, J., 2011. *Consideraciones en el mezclado del concreto*, s.l.: s.n.
- MULLER, C., 2005. *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics*, s.l.: s.n.
- MURAT, M. A. C. C., 1983. *Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite.*, s.l.: Cement and Concrete Research.
- MURRAY, H., 2002, . *Industrial Clays Case Study.*, s.l.: s.n.
- OLIVIER, J. J.-M. A. J. P., 2012. *Trends in global CO2 emissions 2012*, s.l.: ISBN 978-92-79-25381-2.
- PEKMEZCI, B. A. A., 2004. *Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum*, s.l.: Elements and Concrete Research.
- PERA, J. S. H. A. G., 1999. *Influence of finely ground limestone on cement hydration*, s.l.: Cement Concrete Composites.
- SCRIVENVER, K., 2008. *Innovation in use and research on cementitious material*, s.l.: Cement and Concrete Composites.
- SHI, C. A. R. D., 2001. *Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans*, s.l.: Cement and Concrete Research.
- TAYLOR, H. F. W., 1990. *Cement Chemistry.*, s.l.: s.n.
- TIRONI, A., 2013. *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre la estructura y actividad puzolánica*, s.l.: s.n.
- TTUNALI, L. B. U. A. F. B., 2004. *Effect of material characteristics on the properties of blended cement containing high volumes of natural pozzolans*, s.l.: Cement and Concrete Research.

WBCSD, 2009. *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, s.l.: International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, www.wbcsdcement.org.

WBCSD, I., 2009. *Cement Technology Roadmap, Carbon emissions reductions up to*, s.l.: s.n.

Anexos

Anexo I UNE.EN.197.1.2011

Tipos	Denominación	Designación	Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ²⁾	Composición (proporción en masa ¹⁾)										
						Componentes principales					Componentes minoritarios					
						Puzolana Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V	Calizas W	Esquistos calcinados T	Caliza ^{h)}		Componentes minoritarios			
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	L	LL	0-5		
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-P	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-P	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5		
CEM II	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5		
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5		
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5		
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5		
		CEM II/A-M	80-94	-	-	-	----- 6-20 ----->									
		CEM II/B-M	65-79	-	-	-	----- 21-35 ----->									
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
CEM V	Cemento compuesto ^{a)}	CEM V/A	65-89	-	<-	----- 11-35 ----->										
		CEM V/B	45-64	-	<-	----- 36-55 ----->										
		CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->										
	CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->											

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los compo
 2) El porcentaje de humo de sílice en (%), para CEM II/A, CEM II/B, M, or
 3) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado
 4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado

Los compuestos CEM V/A y CEM V/B los componentes principales diferentes del clinker deben
 asa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

Los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).
 n cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en cemen
 partido A1.1.2.).

Anexo II Valores de Resistencia a Compresión y a flexo-tracción

Cemento LC3 50(2:1)												
Edades	1d			3d			7d			28		
Prob.	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 1d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 3d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 7d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 28d
1	536.2	7.6	12.3	498.5	9.3	14.5	564.3	24.6	40.1	527.3	17.9	30.8
2			12.1			13			41.9			32.8
3	528.4	7.6	11.4	511	11.5	14.5	552.6	16	38.4	527.5	19.9	33.2
4			12.1			17.2			33.9			31.1
5	548	7.7	14.3	514.3	13.4	17.9	542.6	14.6	31.3	549.5	21.4	39.6
6			13.1			20.2			29			39.2

Cemento LC3 50(1:1)												
Edades	1d			3d			7d			28		
Prob.	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 1d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 3d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 7d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 28d
1	567.2	12.1	19.5	576.8	25.9	46.7	571.5	33.4	60.2	573.2	33.6	64
2			21.2			48			61.1			63.8
3	578.4	15.2	21.7	554.3	21.4	41.1	570.7	32.6	60.2	577.9	34.8	66.5
4			21.9			44.4			58.2			66.1
5	552.7	10.7	18.2	569.1	22.7	46.2	569.7	31.9	51.3	581	35.2	71.1
6			17.9			45.6			57.4			67.2

Cemento LC3 65(2:1)												
Edades	1d			3d			7d			28		
Prob.	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 1d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 3d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 7d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 28d
1	600.4	15.9	20.5	574.3	27.7	49.9	567.5	21.3	62.4	577	38.6	74.8
2			19.4			48.9			62.3			75.8
3	580	15.3	19.3	568.6	26.4	48	573.8	29.3	65.1	584.6	39.8	80.8
4			19.3			42.8			61.6			78.8
5	591.4	13.7	20.5	572.6	27.2	47.9	565.8	23.5	60.2	579.7	38.9	79.7
6			19.3			47.8			65.4			74.8

Cemento LC3 65(1:1)												
Edades	1d			3d			7d			28		
Prob.	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 1d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 3d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 7d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 28d
1	557.3	10.3	12.1	563.7	26.2	49.3	549.4	25.4	41.1	574	38.9	74.9
2			11.7			48.3			42.1			73.3
3	562.4	10.7	12	561.6	25.9	47.8	565.9	26.9	40.3	571.9	36.9	74.2
4			12.4			43.1			38.4			69.8
5	564.8	10.9	12.6	564.1	27.6	51	555.2	27.7	45.6	566.2	41.6	78.4
6			12.9			49.2			45			75.6

Patrón P-35												
Edades	1d			3d			7d			28		
Prob.	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 1d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 3d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 7d	Peso (g)	Fuerza (kN)	f'c 28d
1	577.2	12	15.1	500.3	6.2	11.6	570.6	29.1	46.6	553.4	30.2	50.3
2			15.7			10.2			48.9			53.4
3	582.3	11.3	14.9	508.7	9.6	11.3	580.5	26.7	42.5	567.2	30.3	55.2
4			15.1			14.1			45.5			52.8
5	578.3	12.1	15.2	507.1	9.2	11.4	587.5	29.1	44.3	553.5	28	49.6
6			15.4			11.4			47.3			49.2

Anexo III Valores del Minicono

		Diamet. 1	Diamet. 2	Diamet. 3	Diamet. 4
Patrón P-35	1	7.6	7.8	7.6	7.4
	2	7.2	7.6	7.8	7.6
	3	7.8	7.5	7.9	7.6
LC3 50 (2:1)	1	4.4	4.3	4.5	4.3
	2	4.2	4.3	4.6	4.3
	3	4.3	4.5	4.5	4.6
LC3 50 (1:1)	1	4.4	4.3	4.3	4.2
	2	4.3	4.4	4.4	4.4
	3	4.1	4.4	4.2	4.3
LC3 65 (2:1)	1	4.6	4.5	4.7	4.8
	2	4.5	4.6	4.6	4.6
	3	4.7	4.8	4.8	4.6
LC3 65 (1:1)	1	4.7	4.7	4.6	4.8
	2	4.6	4.5	4.5	4.6
	3	4.4	4.5	4.3	4.4

Anexo IV Análisis estadístico del ensayo del Minicono

Formulaciones	Desviación Estándar
LC3 50 2:1	0.217
LC3 50 1:1	0.046
LC3 65 2:1	0.055
LC3 65 1:1	0.107

Se utilizó un nivel de confianza del 95% así q según los resultados la probabilidad de error es casi nula.

