UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono.

Autor: Adrian Aguiar Pérez

Tutor: Msc. Ing. Pedro Seijo Pérez

Santa Clara
2014

La ciencia no sirve sino para darnos una idea de cuan vasta es nuestra ignorancia.

Félecité de Lamennais

A mi abuela, alma de mi alma, porque a su existencia
debo casi todos mis logros.
A mi hermana, por ser un segmento importante de mi vida.
A mi novia, porque sin su amor nada sería posible.
A mis padres, por darme la vida.
A mi mejor y eterno amigo Yoelvis, por la dicha de su amistad.
A mis abuelos paternos, porque aunque ya no estén,
hay una parte de ellos en todo lo que hago.

Agradecimientos

A mi tutor, por su apoyo en todo momento y ejemplo de profesional.

A mi familia, por todo su amor, entrega y empeño.

A mi novia, por su apoyo y amor incondicional.

A mi amigo Yoelvis, por estar en los buenos y malos momentos de mi vida.

A todos mis compañeros de aula, por compartir conmigo estos cinco años.

A Dayán y Yuniel, por soportarme todo este tiempo y ayudarme siempre.

A todos los profesores y trabajadores de la Facultad de Construcciones.

A todos aquellos que de una forma u otra han contribuido
y brindado su apoyo a la realización de este trabajo.

A todos,

¡Gracias!

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el comportamiento físico-mecánico de morteros, bloques huecos de hormigón y tejas de microconcreto a base de Cemento de Bajo Carbono (LCC), aglomerante ternario sobre la sustitución del contenido Pórtland por un 45 % de la combinación arcilla calcinada-carbonato de calcio con una relación 2:1 entre ellas; elaborado en la Fábrica de Cemento de Siguaney. Primeramente fue acopiada la materia prima y caracterizada, además fue elaborado un diseño experimental basado en la elección de los ensayos, las diferentes edades a los que estarían aplicados y la cantidad de muestras para los diferentes elementos. Para evaluar las propiedades reológicas de este aglomerante en los morteros se realizaron los ensayos de absorción de agua por capilaridad, resistencia a flexión, a compresión y a la adherencia por tracción; asimismo se ensayaron muestras con cemento PP-250. Los resultados de la resistencia a compresión y la absorción de ambos aglomerantes fueron analizados estadísticamente mediante el programa Statgraphics, demostrando la influencia de cada tipo de cemento. Aunque los morteros producidos con LCC presentaron más absorción y más baja resistencia a compresión, cumplieron satisfactoriamente a los 28 días con la resistencia a compresión establecida. Los bloques fabricados fueron ensayados en cuanto a resistencia a compresión y absorción, presentando resultados satisfactorios, igualmente las tejas de microconcreto ensayadas a resistencia a flexión y permeabilidad.

.

ÍNDICE

Introducción 1

CAPITULO I. INFLUENCIA DE LOS CEMENTOS TERNARIOS A BASE DE METACAOLÍN Y CARBONATO DE CALCIO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MORTEROS Y HORMIGONES 6

1.1 Materiales Cementicios Suplementarios 6

1.1.1 Puzolanas 6

1.1.2 Arcillas Calcinadas 8

1.1.3 Caracterización del metacaolín y su uso como material cementicio suplementario 10

1.2 El sistema clínquer - metacaolín – carbonato de calcio 11

1.2.1 La reacción puzolánica 13

1.2.2 Factores que modifican la actividad puzolánica 13

1.3 Los morteros 14

1.3.1 Definiciones 14

1.3.2 Clasificación de los morteros 15

1.3.2.1 Según los materiales que los componen 15

1.3.2.2 Clasificación de los morteros de acuerdo a su uso 17

1.3.2.3 Clasificación de los morteros de acuerdo a su fraguado 18

1.3.3 Propiedades físico-mecánicas de morteros y hormigones elaborados con arcillas caoliníticas calcinadas (metacaolín) 18

1.4 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades. 21

1.4.1 Características de los hormigones para la producción de bloques 22

1.5 Las tejas de microconcreto (TMC) 23

1.5.1 Los materiales que conforman el microconcreto para el caso particular de la teja 24

1.5.2 Los moldes 26

1.6 Conclusiones parciales 26

2.1 Generalidades 28

2.2 Diseño experimental 28

2.3 Caracterización y preparación de las materias primas para la producción de los morteros....29

2.3.1 Hidrato de cal....29

2.3.2 Árido fino....30

2.3.2.1 Árido fino para la producción de muestras a utilizar en el ensayo de resistencia a la adherencia....31

2.3.3 Propiedades físico–mecánicas de los aglomerantes....32

2.3.4 Agua....33

2.4 Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón....33

2.4.1 Árido grueso....33

2.4.2 Árido fino....34

2.4.3 Polvo de piedra....35

2.5 Caracterización del árido para la producción de TMC....36

2.6 Fabricación de mezclas para morteros. Elaboración de las probetas de morteros....38

2.6.1 Determinación de consistencia en la mesa de sacudidas....39

2.7 Fabricación de bloques huecos de hormigón....39

2.8 Fabriación de tejas de microconcreto....41

2.9 Descripción de los ensayos realizados a las probetas de morteros....42

2.9.1 Determinación de la resistencia a flexión y compresión....42

2.9.2 Determinación de la absorción de agua por capilaridad....42

2.9.3 Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción....43

2.10 Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón....44

2.10.1 Resistencia a la compresión....44

2.10.2 Absorción....44

2.11 Descripción de los ensayos realizados a las tejas de microconcreto....44

2.11.1 Ensayo de flexión....44

2.11.2 Ensayo de permeabilidad....45

2.11.3 Ensayo del peso....45

2.12 Conclusiones Parciales 45

Capítulo III: Análisis de los resultados 47

3.1 Análisis de los resultados de los ensayos realizados a los morteros 47

3.1.1 Análisis de los resultados de los ensayos de resistencia a flexión y compresión a probetas prismáticas de morteros 47

3.1.2 Análisis de los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad a las probetas de morteros 49

3.1.3 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la adherencia por tracción a las muestras de morteros.....51

3.2 Análisis de los resultados de los ensayos a los bloques huecos de hormigón.....51

3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de absorción a los bloques huecos de hormigón.....51

3.2.2 Análisis de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los bloques huecos de hormigón.....52

3.3 Análisis de los resultados de los ensayos realizados a las tejas de microconcreto 53

3.3.1 Análisis de las dimensiones las tejas de microconcreto.....53

3.3.2 Análisis de los resultados del ensayo de resistencia a flexión a las tejas de microconcreto 54

3.3.3 Análisis de los resultados del ensayo de permeabilidad a las tejas de microconcreto 54

3.4 Conclusiones Parciales 55

Conclusiones Generales 56

BIBLIOGRAFÍA 58

Anexos 62

Introducción

La cantidad de cemento fabricado en el 2012 fue de 3.9 billones de toneladas (con un aumento de un 20 % en solo 2 años). Si la media del contenido de cemento en el hormigón es asumida como 300 Kg/m³, aproximadamente 13 billones de m³ de hormigón fueron producidos, lo cual es cerca de 2 m³ de hormigón por habitantes del planeta Tierra. No hay otro material que se compare con el cemento y el hormigón en términos de volumen de producción(Hernández, 2013). Debido a estos altos volúmenes de producción y a la continua emisión de gases al medio ambiente relacionados con los procesos a los que son sometidas las materias primas y al consumo de combustibles fósiles, convierten a la producción de cemento en una de las industrias más contaminantes. Es conocido que por cada tonelada de cemento producida, se genera aproximadamente una de dióxido de carbono (CO_2), un importante gas de efecto invernadero.

Por tales razones los científicos e investigadores vinculados con la producción del cemento han creado una serie de estrategias para reducir el impacto ambiental, las cuales se pueden agrupar en: 1) modernización tecnológica, 2) uso de combustibles alternativos y 3) 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 (Hernández, 2013).

Las cenizas volantes, las escorias de altos hornos y el humo de sílice se encuentran dentro de las puzolanas de más amplia utilización, todos estos materiales derivan de procesos y tecnologías industriales no siempre disponibles y su producción y calidad escapan al control de la industria cementera. Es también importante señalar que, a largo plazo, sus reservas y potencial producción no podrán suplir su creciente demanda.

El factor de reducción de clínquer mediante la utilización de estos MCS en este sentido es limitado por la disminución de la resistencia, sobre todo a edades tempranas, lo cual depende de la disponibilidad de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) proveniente de la hidratación del cemento y del aumento de la demanda de agua. De manera general el límite en los niveles de sustitución para los cementos puede variar, llegando hasta el 30 % en dependencia del tipo de material cementicio utilizado (Papadakis, 2002).

Las arcillas son minerales ampliamente diseminados por toda la corteza terrestre, que pueden ser activadas mediante procesos térmicos que requieren mucho menos energía que la demandada por la elaboración del clínquer. Su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para ser empleadas como puzolanas artificiales en la producción de morteros y hormigones. En

los últimos años se maneja la idea de que se puede usar materiales que rompen con el sistema de fabricación del clínquer tradicional como son:

-Calizas dolomíticas, pueden ser usadas sin ningún problema y no tienen que ser quemadas.

-"Arcillas de baja calidad*",* con un más bajo contenido del mineral caolinita pueden ser usadas, de ahí que no entra en ninguna competencia con la aplicación clásica de la arcilla en la industria de la cerámica.

Investigaciones recientes reportan estudios sobre la obtención de un tipo de aglomerante a partir de la utilización de materias primas cubanas, incluyendo el aprovechamiento de las potencialidades que ofrecen los yacimientos de arcillas caoliníticas de bajo grado existentes en el país como fuente de puzolanas reactivas. Este es el caso del Cemento de Bajo Carbono (LCC) una formulación novedosa desarrollada por un equipo técnico del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana, Suiza, que permite sustituir hasta un 60% del clínquer, material más costoso del cemento, por una combinación de arcilla calcinada, conocida como metacaolín y carbonato de calcio ($CaCO_3$) en forma de piedra caliza. Esta última sin quemar, hecho que evitaría la emisión de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera (Cabrera, 2013).

El metacaolín (MK) es uno de los MCS más estudiados por las ventajas en el ahorro de recursos energéticos y la disminución de las emisiones de CO_2 que provoca su utilización como sustituto de una porción de clínquer. El MK es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 650°C y 800°C; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina que al perder el agua combinada por la acción térmica destruye la estructura cristalina del caolín (Díaz, 2010).

Se ha demostrado que el uso de MK acelera la hidratación del cemento Pórtland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Lara, 2010).

Lo anteriormente expuesto da lugar a nuestra **situación problémica**, expresada como la necesidad de disminuir el elevado costo de los productos de la construcción y de la producción del cemento, unido a la necesidad de crear variantes para la conservación del medio ambiente afectado por las grandes cantidades de emisiones de gases

contaminantes asociados a los altos niveles de producción de cemento, demanda la aprobación del uso del LCC en la elaboración de productos que no lleven refuerzo como bloques, tejas de microconcreto; así como morteros para la construcción de edificaciones.

La aplicación del LCC traerá consigo beneficios para el medio ambiente debido al ahorro de energía proveniente de la no ignición de las calizas, además con un intervalo de 750 a 800 °C, la temperatura de calcinación es casi cerca de la mitad de 1450 °C que necesita la fabricación del clínquer, esto hace que sea menos el consumo de fuel y no hay emisiones de CO_2 de la descarbonatación de la caliza (Hernández, 2013).

Dentro de este contexto, la presente investigación se plantea como **problema científico:**

¿Cómo obtener morteros y prefabricados de pequeño formato: bloques huecos de hormigón y tejas de microconcreto que cumplan con las propiedades físico-mecánicas normalizadas, a partir del empleo del Cemento de Bajo Carbono?

Para ello se traza la siguiente **hipótesis**

A partir del empleo del Cemento de Bajo Carbono, es posible la elaboración de morteros y prefabricados de pequeño formato para la construcción de edificaciones que cumplan con las propiedades físico-mecánicas establecidas en las normas cubanas.

Objeto de investigación

Elaboración y evaluación de productos de la construcción.

Campo de acción

Construcciones de edificaciones.

Objetivo general

Obtener productos de la construcción, a partir de la proyección de dosificaciones de mezclas empleando el Cemento de Bajo Carbono y evaluar sus propiedades físico-mecánicas.

Objetivos específicos

1. Evaluar las propiedades físico-mecánicas de las tejas de microconcreto fabricadas en el municipio de Quemado de Güines haciendo uso del Cemento de Bajo Carbono.
2. Evaluar las propiedades físico-mecánicas de los morteros elaborados a base de Cemento de Bajo Carbono con arena de la cantera Sergio Soto (El Hoyo).
3. Evaluar las propiedades físico-mecánicas de los bloques huecos de hormigón elaborados en el municipio de Manicaragua a base de Cemento de Bajo Carbono.

4. Comparar mediante la realización de ensayos en correspondencia con las exigencias normadas los morteros producidos a base de cemento PP- 250 con los de Cemento de Bajo Carbono.

Novedad Científica

La novedad del trabajo es que demuestra la posibilidad de utilizar el Cemento de Bajo Carbono en la elaboración de morteros, tejas de microconcreto y bloques huecos de hormigón, una vez evaluadas las propiedades físico-mecánicas de estos.

Aportes

Aporte Teórico:

Se incrementa la Información Científica Técnica (ICT) ampliando el campo de utilización del Cemento de Bajo Carbono.

Aporte Técnico:

Se demuestra que el uso del Cemento de Bajo Carbono puede ser utilizado en la elaboración de productos para la construcción y estos cumplen las exigencias reguladas en las normas.

Aporte Económico:

Se disminuye el costo de elaboración de productos para la construcción con el uso del Cemento de Bajo Carbono.

Aporte Social:

Se contará con un mercado con mayor oferta y precios más reducidos de los productos para la construcción.

Métodos y **técnicas** empleadas

Diseño y experimentación de mezclas de morteros y hormigones mediante métodos de nivel teórico y empírico.

La estructura de los **capítulos** del trabajo es:

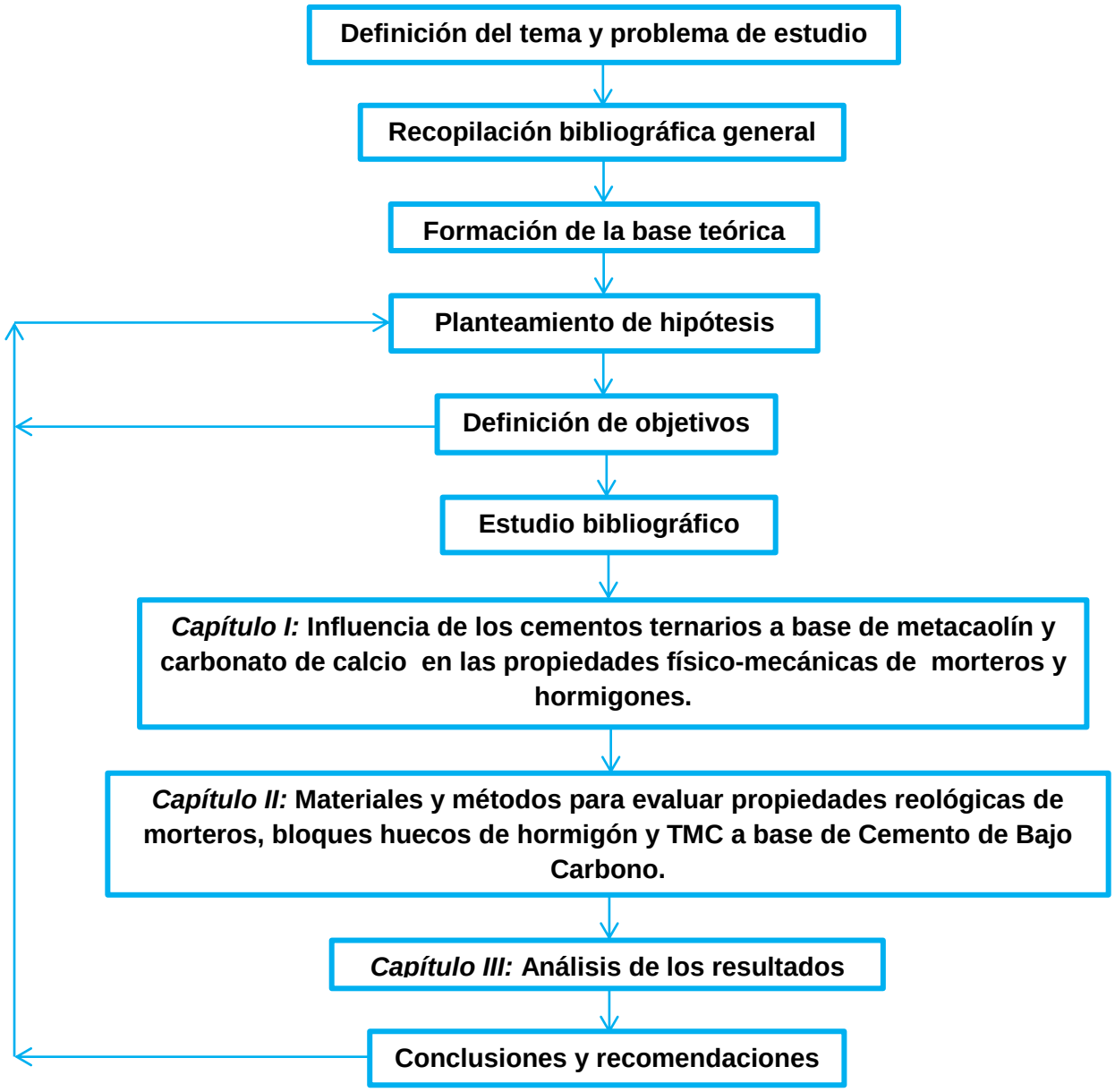
Capítulo I. Se presenta una revisión bibliográfica acerca del comportamiento de morteros y hormigones a base de cementos ternarios.

Capítulo II. Se presentan los resultados de las caracterizaciones de los materiales usados en las mezclas para los morteros, bloques huecos de hormigón y las tejas de microconcreto a base de Cemento de Bajo Carbono; así como los ensayos normados correspondientes para estos productos con el objetivo de evaluar sus propiedades físico-mecánicas y de establecer una comparación entre los mismos a base de cemento Portland PP-250.

Capítulo III. Se presentan los resultados de los ensayos, para así poder obtener materiales de la construcción mediante las potencialidades del Cemento de Bajo

Carbono como fuente de materia prima. Posteriormente se brindan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Esquema Metodológico de la Investigación



CAPITULO I. INFLUENCIA DE LOS CEMENTOS TERNARIOS A BASE DE METACAOLÍN Y CARBONATO DE CALCIO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MORTEROS Y HORMIGONES.

1.1 Materiales Cementicios Suplementarios

Por su flexibilidad, prestaciones en uso, disponibilidad de materias primas y bajos costos en comparación con otras alternativas, el hormigón es el material más adecuado para satisfacer la creciente demanda constructiva asociada al desarrollo de la sociedad. Sin embargo, la producción de su principal componente, el cemento Pórtland (CPO), está asociada a un alto consumo energético, principalmente en la forma de combustibles fósiles, y a grandes volúmenes de emisiones de CO_2, factores que influyen negativamente en sus costos y sostenibilidad ambiental.

Entre las mejores soluciones a este problema se encuentra el empleo de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del CPO, lo cual favorece la disminución en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero por volumen del aglomerante, al mismo tiempo que permite el mantenimiento o incremento de la resistencia mecánica y de la durabilidad frente a un determinado número de agentes ambientales, obteniéndose notables beneficios desde el punto de vista ingenieril, económico y ecológico (Alujas, 2010).

1.1.1 Puzolanas

Dentro del amplio grupo de los MCS se encuentran las puzolanas, según

ASTM-C 608-92a define las puzolanas como materiales silíceos o aluminosos, los cuales por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementicias. De modo más amplio puede agregarse, que los productos formados son silicatos y alumosilicatos hidratados, similares a los resultantes del fraguado del cemento Portland (Betancourt, 2013).

Uno de los sistemas de clasificación más completos es el presentado por Massazza (Massazza, 1993), donde plantea que según su origen, las puzolanas son divididas en dos grandes grupos: naturales y artificiales. Dentro de las naturales se agrupan: cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas (zeolitas) y tierras de diatomeas (diatomitas). Dentro de las artificiales se concentran: cenizas volantes (fly ash), arcillas activadas térmicamente, microsílice (silica fume) y la combustión de muchos residuos agrícolas proporciona cenizas con elevado contenido de sílice que presentan distinto grado de puzolanicidad. Ejemplos de ellos son las cenizas de: cáscara de arroz, caña

de azúcar, bambú, etc. También forman parte de este conjunto de los MCS las escorias de alto horno y los materiales empleados como filler (Megat, 2011).

Debido a la creciente necesidad de producción de CPO en los países en vías al desarrollo, es de vital importancia sentar las bases para alcanzar un desarrollo sustentable, más económico y con un menor impacto ambiental en el proceso de producción del CPO. Por tanto, urge desarrollar nuevas tecnologías y estrategias que permitan la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo las condiciones propias de estos países.

Ante este problema, se prevé un futuro escenario donde los materiales puzolánicos comenzarán a ser explotados con más intensidad, trayendo como consecuencia que las reservas y potencial producción de los productos más empleados tradicionalmente como puzolanas no podrán suplir la creciente demanda.

Las arcillas calcinadas y el carbonato de calcio ($CaCO_3$), sin embargo, son alternativas interesantes para países industrializados y en vías de desarrollo. La mayoría de las arcillas y el carbonato de calcio están distribuidos de forma uniforme en la geografía del Planeta, de forma que pueden ser considerados materiales de abundante disponibilidad. Ambos son comúnmente utilizados en la producción de cemento, así que cerca de las fábricas de cemento existen reservas de estos materiales, e instalaciones para su procesamiento. Las reservas existentes de ambos materiales, aunque no renovables, pueden ser explotadas hasta cierto punto sin infringir un severo daño ambiental, y su disponibilidad excede la de cualquier otro MCS conocido.

Dentro de los materiales empleados como filler se encuentra la piedra caliza (limestone), la cual se usa ampliamente como material extensor del clínquer. Esta caliza, al ser molida conjuntamente con el clínquer que es mucho más resistente, puede alcanzar valores muy altos de finura. Este reemplazo produce un efecto físico que provoca la dispersión de los granos de cemento acelerando su velocidad de hidratación y la precipitación de carboaluminatos de calcio hidratado, además que suplen las discontinuidades en la granulometría del clínquer ya que actúan como material de relleno entre sus granos.

Algunos autores atribuyen este incremento a que las partículas de la caliza actúan como centros de nucleación alrededor de los cuales se depositan los cristales de Pórtlandita (CH), conocido como efecto filler (Menéndez, 2006). Químicamente, al reaccionar con la alúmina, forman los mono-carbo-aluminatos, lo cual los hace competir con el yeso añadido para completar la formulación final del cemento mezclado.

De forma general, los efectos positivos del empleo de los MCS como sustitutos parciales de los contenidos de clínquer, están relacionados a los efectos que ellos tienen en la estructura de poros (Sakai, 2005).

El empleo de adiciones minerales para la producción de cementos mezclados no solo trae beneficios ecológicos, sino que contribuye a la mejora de determinadas propiedades en los hormigones, tales como menor calor de hidratación, resistencias mecánicas finales superiores, alta resistencia ante sulfatos, baja permeabilidad, así como baja reactividad álcali-agregado (Lawrence, 2005).

1.1.2 Arcillas Calcinadas

Existe una amplia variedad de materiales que pueden ser empleados como puzolanas. Algunos se encuentran ya en explotación como es el caso de las cenizas volantes, las escorias siderúrgicas o el humo de sílice. Sin embargo, se conoce que las reservas de estos materiales son insuficientes para suplir a largo plazo su creciente demanda, además de que el acceso a estas fuentes está limitado por factores económicos y regionales (Sabir, 2001). Se hace necesaria entonces la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos que permitan el reemplazo parcial de significativas porciones de CPO en el aglomerante, manteniendo o mejorando su resistencia y durabilidad.

Las arcillas, de comprobadas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas, representan, por su amplia disponibilidad y relativa facilidad de tratamiento, una atractiva fuente de puzolanas en regiones donde otros recursos no están disponibles (Alujas, 2010).

Bajo el término arcillas se engloba un extenso grupo de minerales cuyos elementos predominantes son la sílice (Si), la alúmina (Al) y los Óxidos (O) (Brown). Los minerales arcillosos no pueden ser empleados como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica a la mezcla. La activación de minerales en las adiciones puede lograrse mediante la activación física: por el aumento en la finura de la adición; la activación térmica: por el incremento en la temperatura de curado, y la activación química: por la incorporación de hidróxidos alcalinos (Bonavetti, 2006), de estos la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas alcanzando la máxima reactividad puzolánica. La activación térmica o calcinación de arcillas es una importante vía para la producción de puzolanas, este proceso consiste en calentar la arcilla hasta una temperatura dada para eliminar su agua estructural, modificando así su estructura cristalina original para hacerlo químicamente más reactivo. Este proceso

es conocido como desoxhidrilación. Opuesto al mineral original que tiene altos niveles de cristalinidad, una fase arcillosa metaestable tiene más alto desorden estructural, característico que favorece su capacidad de solubilizarse y reaccionar químicamente.

Varios factores favorecen el empleo de las caolinitas en la obtención de materiales puzolánicos, en comparación con otros tipos de minerales arcillosos también abundantes como la illita y la montmorillonita. Para las arcillas del tipo caolinita, el amplio intervalo que existe entre la temperatura de deshidroxilación y la recristalización y sinterización, es mucho mayor que para la montmorillonita o la illita, presentando el proceso de deshidroxilación a menores temperaturas lo que favorece su activación térmica a un menor costo energético.

Entre los 400°C y los 950°C ocurre la remoción de los OH^- estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Heller-Kallai, 2006).

La pérdida de los OH^- desestabiliza eléctricamente la estructura. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse durante el proceso de desoxhidrilación. La desestabilización de cargas eléctricas y la ruptura de los enlaces químicos por el calentamiento provocan el colapso parcial de la estructura (Díaz, 2010).

Estudios demostraron que la arcilla cubana, con sólo un 40% de caolinita, mostró una excelente reactividad puzolánica y el mayor potencial de activación, cuando estuvo calcinada entre 600ºC y 800ºC. El tiempo requerido para que la reacción puzolánica comience a ser significativa parece depender del contenido de caolinita de la arcilla y puede variar entre 1 y 7 días. Estas arcillas calcinadas en sustitución del cemento favorecen la formación de fases AFm, tales como hemicarboaluminato o monocarboaluminato. La strätlingita fue también detectada mediante RMN del 27Al y la resistencia en compresión de los morteros, incorporando las arcillas calcinadas a base de caolinita, fue sistemáticamente similar o superior a la referencia (100%CPO) a partir de 7 días aproximadamente, mientras que la permeabilidad fue reducida. Estos resultados indican que los suelos arcillosos calcinados tienen un gran potencial para reemplazar al cemento en los trabajos con hormigón, otorgándole un carácter siempre más duradero (Rodrigo, 2009).

En resumen, la reactividad puzolánica de las arcillas está altamente relacionada con la naturaleza de la materia prima, composición mineralógica y grado de cristalinidad de los minerales que la forman, las condiciones del proceso térmico (temperatura y tiempo

de desoxhidroxilación) y sus características propias, tales como morfología, forma y tamaño de las partículas, entre otras.

1.1.3 Caracterización del metacaolín y su uso como material cementicio suplementario

La utilización de metacaolín como aditivo en la producción de cementos constituye una de las medidas de sustentabilidad económica y ambiental de la industria cementera. El MK es una puzolana altamente reactiva por su composición química, su alto grado de desorden estructural y su finura que le permite tener una gran superficie de reacción, favoreciéndose la capacidad aglomerante.

El MK es uno de los MCS más estudiados por las ventajas en el ahorro de recursos energéticos y la disminución de las emisiones de CO_2 que provoca su utilización como sustituto de una porción de clínquer. El MK es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 650°C y 800°C. Con este proceso se modifica la estructura cristalina original mediante la adición de energía en forma de calor y al perder el agua estructural se destruye la estructura cristalina del caolín (Díaz, 2010), convirtiéndolo en un material muy reactivo con el ambiente que lo rodea. Este proceso se conoce como desoxhidroxilación donde los grupos OH^- que forman parte de la estructura, al ser eliminados, producen un material meta estable. El nombre de meta-caolín es debido precisamente a este fenómeno y se emplea para nombrar al caolín activado con elevadas propiedades puzolánicas.

La actividad puzolánica del MK se evidencia cuando al adicionarlo al CPO se obtiene un material con una serie de ventajas sobre el CPO sin adiciones, tales como (Restrepo, 2006):

- Incremento de las propiedades mecánicas, especialmente, a edades tempranas.
- Incremento de la resistencia al ataque de sulfatos.
- Incremento de la resistencia a la reacción alcali-sílice.
- Incremento del refinamiento de poros.
- Decrecimiento de la permeabilidad.
- Decrecimiento de la corrosión del refuerzo.
- Disminución en la evolución del calor de hidratación.

La adición de MK a los cementos para la producción de morteros u hormigones, producen cambios de fase y transformaciones micro-estructurales que inciden en las propiedades físicas y químicas del material. Los iones OH^- que se producen en la

hidratación del cemento, se depositan en los poros del hormigón y al entrar en contacto con la sílice amorfa de las puzolanas, como es el caso del MK, se forma un gel extra de silicato de calcio hidratado y se reduce el hidróxido de calcio, otorgándole ventajas importantes a las mezclas, tales como el aumento de sus resistencias mecánicas y la disminución de la porosidad, por lo que han llamado un efecto de micro relleno.

En otras investigaciones se ha demostrado que el metacaolín acelera la hidratación del cemento, lo que muestra un rápido decrecimiento del agua libre de la mezcla y una drástica reducción de la Pórtlandita, lo cual se debe a su alta actividad puzolánica, además los concretos a los cuales se le adiciona MK tienen mejor trabajabilidad. Estas adiciones permiten la formación del gel de tobermorita, el cual tiene una estructura muy fina que determina el refinamiento de los poros de las muestras y como consecuencia de esto, genera una reducción de la permeabilidad y una mejor compacidad.

EL uso MK tiene un importante efecto en la disminución de la expansión producida por la reacción álcalis-agregado. Además, se evidenció como las grietas y el deterioro superficial presentes en una mezcla control de Pórtland puro, fueron virtualmente eliminados en aquellas que usaron metacaolín en sustitución del cemento. Efecto muy similar aparece ante la acción de soluciones agresivas (agua de mar, ataque de sulfatos), donde sistemas cementicios en presencia de metacaolín mostraron mejores comportamientos (deterioro superficial o estructural, resistencia a la compresión, difusión de iones dañinos) frente a aquellos de Pórtland puro (PHAIR, 2006).

Generalizado, los principales aportes del MK en las propiedades mecánicas de pastas, morteros y hormigones se concentran en la disminución de los contenidos de cal libre en las mezclas, refinamiento de la estructura de poros, reducción de la retracción química y autógena, el favorecimiento del desarrollo de la resistencia a la compresión y un mejoramiento de las propiedades durables del material. Este último aspecto es de interés fundamental para el caso de Cuba, ya que el estudio de la durabilidad de materiales a base de cemento ternarios se hace necesario debido a las características geográficas y meteorológicas propias del país (Lara, 2010).

1.2 El sistema clínquer - metacaolín – carbonato de calcio

El hormigón es el material de construcción con el mayor potencial para atender la creciente demanda de vivienda en los países en desarrollo. No obstante, los materiales disponibles a nivel local deben ser considerados como posible reemplazo, con miras a abaratar los costos y el impacto ambiental asociados a la producción del cemento.

En el mundo el uso de materiales puzolánicos como el metacaolín para la fabricación de hormigones y morteros está creciendo cada vez más. Su uso normalmente es relacionado con la reacciones del proceso de hidratación del cemento o a la mitigación

de reacciones que ocurren en el proceso de fraguado del hormigón. La introducción de partículas finas como el MK puede provocar fuertes efectos sobre las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido.

La efectividad de un material puzolánico depende de su reactividad, la cual a su vez depende de dos factores: del contenido de hidróxido de calcio con el cual debe reaccionar y de la velocidad con la cual ocurre la reacción puzolánica, factores directamente relacionados con la fineza del material. Al ser este material muy fino, puede presentar un efecto del relleno, promoviendo una disminución en el sistema de la porosidad total debido al relleno de poros capilares y de la interfaz donde la porosidad es más alta (Díaz, 2010).

El conocimiento acerca de los sistemas metacaolín-CPO y carbonato-CPO se ha incrementado en los últimos años con una mejor comprensión de los mecanismos de reacción. Sin embargo, los sistemas ternarios de clínquer-MK-carbonato de calcio pueden ser una alternativa viable ecológicamente y económicamente para responder a la demanda creciente de viviendas, especialmente en los países en vía de desarrollo. Por tanto merecen mayor atención debido al potencial que presentan para la obtención de sistemas cementicios ternarios con altos por cientos de sustitución de clínquer.

Estudios han demostrado que las arcillas calcinadas en sustitución del cemento favorecen la formación de fases AFm, tales como hemicarboaluminato o monocarboaluminato. La resistencia en compresión de los morteros, incorporando las arcillas calcinadas a base de caolinita, llega a ser sistemáticamente similar o superior a la referencia (100%CPO) a partir de 7 días aproximadamente, reduciéndose la permeabilidad. Estos resultados indican que los suelos arcillosos calcinados tienen un gran potencial para reemplazar al cemento en los trabajos con hormigón, otorgándole un carácter siempre más duradero (Rodrigo, 2009).

Los resultados publicados por Antoni (Antoni, 2013) muestran que la sustitución de hasta 60% en peso del cemento Pórtland por la adición combinada de 40% de metacaolín y 20% de caliza fina permite obtener más del 90% de la resistencia mecánica a 7 días de curado y se mantiene a edades más elevadas. Similarmente, comprobó que 45% de sustitución por 30% de una arcilla calcinada con solo 50% de contenido en caolinita y 15% de cal, el desarrollo de las resistencias a edades tempranas como los 7 días son superiores a la mezcla control con 100 % de cemento Pórtland, lo cual es atribuido a la formación de fases hemicarbo y monocarbo-aluminatos, confirmadas mediante técnicas de difracción de Rayos X.

La piedra caliza es una fuente barata y ampliamente disponible de carbonatos. 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 alumínicas de las arcillas calcinadas, dando lugar a la obtención de fases que estabilizan la fase etringita, 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, Murray, 2000).

1.2.1 La reacción puzolánica

La actividad puzolánica se explica en base a la reacción entre los componentes ácidos de los materiales puzolánicos (sílice, alúmina) con los básicos (cal). La reacción entre éstos ocurre cuando las uniones en dichos materiales son metaestables o lábiles.

Las reacciones puzolánicas, al igual que los procesos de hidratación del cemento, transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos y marcada influencia de factores de tipo interno y externo de las puzolanas.

1.2.2 Factores que modifican la actividad puzolánica

La actividad puzolánica está influenciada tanto por factores inherentes a la puzolana como por otros de carácter externo. Entre los primeros se destaca la composición química y mineralógica, morfología interna, contenido de fase vítrea y finura. Entre los factores externos que influyen en la reacción puzolánica se encuentran la temperatura, la incorporación de aditivos, la presencia de humedad y desde luego la calidad de la cal. A mayor superficie específica o finura, mayor será la velocidad de reacción cal puzolana y este efecto también se favorece con el incremento de la temperatura, sobre todo a edades tempranas. La reacción principal de cualquier material puzolánico es un ataque a las estructuras de silicatos o aluminosilicatos por parte de iones OH^-, para así formar productos similares a aquellos formados por la hidratación del cemento Pórtland (Lara, 2010, Diamond, 2001).

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Pórtland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas

fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Lara, 2011).

Para el caso particular de las arcillas calcinadas, tres reacciones químicas pueden ser planteadas para describir la interacción entre el Ca (OH)2 y la sílice y la alúmina que se encuentran en un estado de alto desorden estructural. En su tesis de doctorado, Díaz (Díaz, 2010) plantea las reacciones tomando como base el Metacaolín (MK).

$$\underset{\text{(Metacaolín)}}{AS_2} + \underset{\text{(Portlandita)}}{5CH} + \underset{\text{(Agua)}}{3H} \rightarrow \underset{\text{(Tetracalcioaluminato hidratado)}}{C_4AH_{13}} + \underset{\text{(Silicato de calcio hidratado)}}{2CSH}$$

$$\underset{\text{(Metacaolín)}}{AS_2} + \underset{\text{(Portlandita)}}{6CH} + \underset{\text{(Agua)}}{9H} \rightarrow \underset{\text{(Tricalcioaluminato hidratado)}}{C_3AH_6} + \underset{\text{(Silicato de calcio hidratado)}}{2CSH}$$

$$\underset{\text{(Metacaolín)}}{AS_2} + \underset{\text{(Portlandita)}}{3CH} + \underset{\text{(Agua)}}{6H} \rightarrow \underset{\text{(Stratlingita o gehhelenita)}}{C_2ASH_8} + \underset{\text{(Silicato de calcio hidratado)}}{CSH}$$

Los productos predominantes de esta reacción son los silicatos de calcio hidratado (CSH) y las fases AFm, mientras que para las puzolanas obtenidas a partir de arcillas ricas en fases reactivas de alúmina, como la caolinita, la presencia de C2ASH8 (stratlingita) y C3AH6 ha sido también detectada (Taylor, 1990).

Entre las mejores soluciones a los problemas asociados con la producción del cemento, como el alto consumo energético, principalmente en la forma de combustibles fósiles, y a grandes volúmenes de emisiones de CO_2, factores que influyen negativamente en los costos de este y en la sostenibilidad ambiental; se encuentra el empleo de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del CPO. Lo cual, al mismo tiempo permite el mantenimiento o incremento de la resistencia mecánica y de la durabilidad frente a un determinado número de agentes ambientales, con lo cual se obtienen notables beneficios desde el punto de vista ingenieril, económico y ecológico (Alujas, 2010).

Múltiples han sido los estudios o aplicaciones de las arcillas calcinadas como sustituyentes del cemento pórtland ordinario, los cuales han probado indistintamente diversos valores de sustitución. En su gran mayoría aparecen sustituciones hasta un 30% como valor máximo (Todor, 1976).

1.3 Los morteros

1.3.1 Definiciones

Salazar (Salazar, 1992) plantea que el mortero se define como el material obtenido por la mezcla plástica de conglomerante, agua y arena, o como un concreto de agregado fino cuyo diámetro máximo es inferior a 5 mm. Los materiales básicos de los morteros son los diferentes conglomerantes, el agua y la arena. Los materiales complementarios son las adiciones. La mezcla de estos materiales genera un producto que fragua y

endurece por procesos físico-químicos adquiriendo una consistencia pétrea. El conglomerante y el agua desempeñan el papel principal en estos fenómenos de fraguado y endurecimiento, en cambio la arena sirve únicamente como sustancia estabilizadora de volumen y como material de relleno. Donde el producto obtenido debe ser trabajable capaz de unir ladrillos, ticholos, bloques de hormigón, baldosas, etc., con una base y también realizar revoques.

La norma cubana NC 175:2002 define por mortero a una mezcla de uno o varios conglomerantes, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos que sirve para unir elementos como ladrillos, bloques, celosías y otros, también sirve para revestimientos de paredes y techos.

1.3.2 Clasificación de los morteros

1.3.2.1 Según los materiales que los componen

- Morteros de cal:

Es el mortero más antiguo. Fue ampliamente utilizado por los romanos. Se obtiene llenando los huecos de la arena con una pasta formada por cal apagada y agua. Se precisa para ello (aproximadamente) un volumen de cal por tres de arena. Las cales utilizadas pueden ser hidráulicas y aéreas. Las cales hidráulicas es interesante mencionarlas. Son las que fraguan bajo el agua porque poseen en su composición constituyentes análogos a los cementos naturales (se obtienen por calcinación de calizas impurificadas con sílice y alúmina) y desarrollan resistencias iniciales relativamente altas. Las cales aéreas, como la cal viva o apagada, no poseen propiedades de fraguado bajo el agua, sino que se entumecen primeramente por pérdida del agua que forma la pasta (por succión de los ladrillos o secado al aire) y sólo, muy lentamente, fraguan y endurecen por carbonatación.

Algunas cales, tanto aéreas como hidráulicas, obtenidas de calizas dolomíticas, tienen alta proporción de $Mg(OH)_2$, son susceptibles de carbonatación como las cales cálcicas. Estas constituyen las mejores cales para uso en la construcción.

- Morteros de cemento-cal-arena, denominados bastardos:

Salazar plantea que estos son una combinación de la cal, cemento Pórtland y arena para obtener morteros de una determinada resistencia y porosidad.

Estos morteros reúnen las propiedades y ventajas de los dos anteriores, o sea, trabajabilidad y altas resistencias iniciales.

Utilizando como base un mortero de cemento 1: 3 se puede ir sustituyendo parte del cemento por cal, mientras que el total de pasta conglomerante sea capaz de rellenar los huecos de la arena. Así se asegura buena trabajabilidad y resistencias iniciales medias.

- Morteros de cemento:

Cuando se precisan altas resistencias iniciales, o bien resistencias elevadas en el mortero endurecido, se pueden utilizar conglomerantes del tipo de los cementos naturales o Pórtland.

Pero no se debe ajustar la resistencia variando la proporción cemento: arena, pues las mezclas pobres en cemento son ásperas e intrabajables porque las partículas de arena rozan entre sí, sin esa especie de lubricante que es la pasta de cemento. Para una composición cemento: arena de 1: 3 en volumen, la pasta es manejable, pero son morteros demasiado resistentes para los usos normales y con alta retracción de secado, susceptibles de producir grietas. Sin embargo, se utilizan estos morteros ricos para obras de ingeniería que exijan grandes resistencias (muros de contención, por ejemplo) y también para elementos de muro que, como los cimientos, van a estar por debajo del nivel del suelo, pues son morteros densos e impermeables.

- Morteros con aditivos

Son morteros que se le adicionan aditivos químicos. Los aditivos que generalmente se emplean son aireantes (que introducen aire en el interior de la masa del mortero) o bien tensoactivos para actuar sobre la tensión superficial de la pasta de cemento, aumentando la retención de agua. Ambos tipos aumentan la trabajabilidad de las mezclas pobres de cemento, pues las burbujas de aire rellenan los huecos entre partículas de arena, y les permiten deslizarse sin rozar entre ellas. Esta disminución de la tensión superficial favorece que la pasta de cemento moje la superficie del árido, lográndose el mismo efecto.

Sin embargo la NC 175:2002, establece que en la fabricación de morteros de albañilería se pueden utilizar cualquier tipo de aditivo, siempre que se pueda demostrar que las propiedades del mortero son las descritas en esta norma y que no ejerzan efectos perjudiciales sobre los demás componentes. Los aditivos que se utilicen no deben afectar desfavorablemente a la calidad de ejecución de la obra, a la durabilidad y a la resistencia de los agentes atmosféricos.

- Morteros preparados con cemento adicionado (cemento de albañilería o mampostería)

Los cementos de adición para albañilería son mezclas de cemento Pórtland con minerales finamente divididos, siendo estos últimos potencialmente hidráulicos (puzolanas, escorias) o totalmente inertes (caliza, caliza dolomítica) desde el punto de vista conglomerante y con adición o no de agentes aireantes. Sus buenas propiedades de trabajabilidad se deben a los finos que contienen, los cuales rellenan los huecos entre áridos. La proporción de adiciones inertes es inferior al 35%.

- Morteros de cemento – cola:

Los cementos – cola, son mezclas de cemento y compuestos orgánicos de tipo resina soluble en agua. Se suelen dosificar al 50% en peso de arena, generalmente bajo instrucciones del fabricante. Estos morteros son muy adherentes y pueden emplearse en su composición arenas finas por la baja tensión superficial que presentan, llegándose a obtener así juntas muy delgadas (2 mm). Además, requieren poca agua de amasado, con la consiguiente disminución de humedad en la obra y el tiempo de espera por secado. Se emplean para aplicar cerámica sanitaria, elaborar juntas delgadas en paneles prefabricados y hacer enlucidos de superficie final muy fina.

1.3.2.2 Clasificación de los morteros de acuerdo a su uso

La NC 52- 79:1993 “Código y práctica para la construcción”. Morteros de albañilería. Parte 1. Diseño y caracterización. Clasifica los morteros de acuerdo a su uso en tipo I; II; III; IV; V. La tabla siguiente describe esta clasificación. (Ver tabla 1.3.2.2)

Tabla 1.3.2.2 Clasificación de los morteros de acuerdo a su uso por la NC: 52- 79:1993.

Usos	Tipo de mortero	R. comp. 28d, mín. (MPa)
1. Muro portante	II-III	3,5 ó 5,2
* De bloques		
* De ladrillos		
2. Muro no portante	I	2,4
3. Muros de cierre	II-III	3,5 ó 5,2
* De bloques		
* De ladrillos		
4. Revestimiento de muros		
* Resano	II-III	3,5 ó 5,2
* Repello grueso	I-II-III	2,4 ó 3,5 ó 5,2
* Repello fino		
5. Enchapes	III	5,2
* Colocación de azulejos		
* Piezas de cerámica		
* Baldosas de cerámica	II	3,5
* Losetas hidráulicas		
* Piedra natural	IV-V	12,4
6. Pisos (de mortero)	IV-V	12,4
7. Colocación de pisos		
* Azulejos	III	5,2
* Losas hidráulicas	I	2,4
* Baldosas de terrazo	II	3,5
*Gres cerámico	IV-V	12,4
*Piedra natural	II-III	3,5 ó 5,2
8. Juntas entre elementos prefabricados	IV	12,4
9. Enlucidos de zócalos sanitarios, cisternas y tanques	IV-V	12,4

1.3.2.3 Clasificación de los morteros de acuerdo a su fraguado

Aéreos: Son los que tienen la propiedad de endurecer en contacto con el aire.

Hidráulicos: Son aquellos morteros que tienen la propiedad de endurecer tanto en contacto con el aire como en el agua.

1.3.3 Propiedades físico-mecánicas de morteros y hormigones elaborados con arcillas caoliníticas calcinadas (metacaolín)

La durabilidad del hormigón se ha convertido recientemente en el centro de investigación de numerosos autores y especialistas en todo el mundo.

La norma cubana NC 250-2005 "Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural", define a la durabilidad como la capacidad del hormigón para soportar durante la vida útil para la que ha sido diseñado, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesto.

Varios son los factores que condicionan las propiedades durables del hormigón. Entre ellos, desde el punto de vista interno, se encuentran la composición y distribución de sus componentes o materias primas, así como las características propias de su diseño estructural. Aquellos con particularidades externas al material, como son el grado de exposición y la agresividad del medio en que se encuentra, también son determinantes de esta propiedad.

El agua, además de constituir el 71% de la corteza terrestre y ser el material más usado por el hombre a escala mundial, puede considerase como la causa fundamental de la degradación de los materiales de construcción, en especial del hormigón. Como uno de los constituyentes de este último, un exceso de su contenido expresado en altas relaciones agua cemento, es perjudicial en la calidad del material. Producto del fenómeno de exudación aumenta la presencia de poros capilares, 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, además de comprometer las propiedades físico - mecánicas del hormigón, influye en su impermeabilidad y por ende en su protección ante las acciones del medio externo, lo que provoca un detrimento de su durabilidad. Mientras más permeable sea el hormigón, con mayor facilidad penetrarán sustancias químicas agresivas, como son los iones cloruro y los sulfatos. Todos ellos necesitan un medio para trasladarse hacia el interior de la masa de hormigón, siendo el agua quien generalmente se lo facilita.

Los mayores esfuerzos han estado encaminados hacia desarrollar las prestaciones del material, de forma tal que sea capaz de soportar los diferentes mecanismos de deterioro a los que estará expuesto. En este sentido, el uso de adiciones minerales activas en la fabricación de hormigones se ha mostrado como una alternativa viable y eficiente para incrementar las propiedades durables de dicho material. Esto se debe básicamente a que aparece un aumento del contenido de los productos de reacción, favorecido por la adicional formación de hidratados de la reacción puzolánica, lo que propicia menor porosidad capilar y por ende superior resistencia y durabilidad (Lara, 2011).

Es conocido que el desarrollo de la resistencia de un cemento con adiciones hidráulicamente activas depende del efecto físico y de la reacción de la adición. Las

partículas de puzolanas son generalmente menos reactivas que las del cemento Pórtland, pero cuando estas partículas, finamente molidas, se dispersan dentro de la matriz cementante, producen un gran número de sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento Portland, acelerando su resistencia inicial. Este efecto físico, denominado efecto filler, tiende a disminuir la pérdida de resistencia a edad temprana del cemento compuesto, dado por la menor cantidad de material inicialmente reactivo. Las partículas de puzolanas reaccionan con los hidróxidos alcalinos generando un gradual decrecimiento del CH y un incremento del CSH y de aluminosilicatos de calcio similares a los obtenidos durante la reacción del cemento Pórtland. Como consecuencia de esta reacción química, se produce el refinamiento de los granos y la segmentación de los poros, aumentando la densidad de la matriz, la resistencia y la inmunidad de la pasta frente al ingreso de los agentes agresivos (Bonavetti, 2006).

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Pórtland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Pórtland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Lara, 2011).

Según Antoni (Antoni, 2013) los buenos resultados de resistencia a la compresión obtenidos en sus estudios publicados en el 2013 se pueden explicar por el refinamiento de la estructura de los poros y la formación sinérgica de carboaluminatos. Esa reacción ocurre entre los aluminatos de la caolinita, los carbonatos de la cal y el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento. La robustez de la reacción sinérgica fue también confirmada a través de la modelación termodinámica en, y la optimización del sistema fue realizada a través del ajuste del contenido de sulfato y de álcali del cemento.

Otros estudios evidencian la considerable influencia del metacaolín en la estructura de poros en morteros y hormigones, produciendo un importante refinamiento de los mismos. Esto conlleva a significantes modificaciones en las propiedades de transporte de agua y en los niveles de difusión de iones agresivos hacia el interior del material.

En los primeros momentos de hidratación se observa el efecto de empaquetamiento, por el acomodamiento de las finas partículas que aún no reaccionan en los espacios libres entre los granos de cemento Pórtland, a medida que avanza la reacción de hidratación, aparecen las condiciones para que ocurra la reacción puzolánica. Los productos de la reacción puzolánica ocupan los espacios creados por los poros capilares, cuyo diámetro se reduce considerablemente. La proporción de poros de gel aumenta, mientras que los capilares disminuyen. Se considera que esta es la causa de la disminución de la permeabilidad en los hormigones fabricados con MCS, que se reporta en algunos casos de hasta en tres órdenes de magnitud en relación a pastas idénticas fabricadas con cemento Pórtland con la misma relación agua/aglomerante.

1.4 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.

Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificios, como casas, edificios de oficinas, fábricas y hasta edificios de varias plantas sin necesidad de soporte estructural adicional. El buen bloque de hormigón es sinónimo de economía y versatilidad, aplicándose a todas las formas constructivas. Es adaptable, creativo y relativamente fácil de usar.

Los bloques de hormigón soportan altas cargas, resisten el fuego, tienen caras y lados bien formados y son uniformemente de la más alta calidad. Están disponibles en cientos de formas, tamaños, colores resistentes a la intemperie y alta estabilidad ante la exposición a la luz de sol y agentes climáticos, texturas lisas y símil piedra, normales e hidrorrepentes.

La experiencia internacional en construcción de bloques de hormigón han demostrado el excelente comportamiento de este sistema constructivo al que se asigna cada vez mayor preferencia sobre otros materiales usados en la construcción como consecuencia de las conocidas ventajas que resultan de su empleo y que en esencia se pueden resumir en resistencia, durabilidad, economía y velocidad constructiva. Esto unido a la simplicidad de fabricación hace de este sistema constructivo uno de los procedimientos más completos parar resolver el problema de las construcciones, en las cuales todas las ventajas de aplicación de los bloques son más evidentes al permitir una economía total en materiales y mano de obra en la fabricación de piezas hasta su colocación que difícilmente puede alcanzarse con otros sistemas.

Según la NC 247- 2010 “Bloques huecos de hormigón. Especificaciones”, los bloques huecos de hormigón son piezas prefabricadas a base de cemento, agua, áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin aditivos, incluidos pigmentos, de forma sensiblemente ortoédrica, con dimensiones exteriores no superiores a 500 mm, con

una relación alto/ancho inferior a 6, y alto/largo inferior a 1, sin armadura alguna con densidades normalmente comprendidas entre 1700 kg/m³ y 2200 kg/m³.

Los bloques se fabrican vertiendo una mezcla de cemento, arena y agregados pétreos (normalmente calizos) en moldes metálicos, donde sufren un proceso de vibrado para compactar el material.

Dentro de las numerosas tipologías de bloques que existen en el mercado podemos citar:

- Cara vista: son bloques con al menos una de las caras especialmente preparadas para no precisar revestimiento.
- De gafa: deben ser posteriormente revestidos con algún tratamiento superficial. Pueden ser empleados con los huecos en vertical y en horizontal, para crear celosías que no impidan totalmente la visión o el paso de aire con el exterior.
- Multicámara: sus huecos internos están compartimentados. Estos bloques se utilizan frecuentemente cuando se pretende construir una pared de una sola hoja. Las divisiones internas aíslan el aire en distintas cámaras, por lo que aumentan el aislamiento de la pared.
- De carga: son más macizos, y se emplean cuando el muro tiene funciones estructurales.
- Armados: diseñados como encofrado perdido de muros macizos de hormigón. Presentan rebajes interiores para apoyar las armaduras de acero.

1.4.1 Características de los hormigones para la producción de bloques

El hormigón que se utiliza para la producción de bloque debe ser un hormigón de consistencia seca para que este pueda conservar su forma al salir de la máquina bloquera que se encarga de compactarlo por un efecto de vibración – compactación. Este tipo de hormigón tiene una contenido de cemento en el rango de 190-270 Kg/m^3 y alcanza una resistencia a compresión bruta a los 28 días entre 2.5-7.0 Mpa.

El tiempo de compactación puede utilizarse como una medida de la consistencia del hormigón y de la efectividad del equipo de compactación. La ACI 207 afirma que un equipo de vibración aceptable debe ser capaz de compactar totalmente las mezclas más secas en 60 segundos, dentro de un amplio rango de dosificaciones. Para la medición de la consistencia de este tipo de hormigón puede utilizarse el consistómetro Vebe.

Una de las vías para reducir la producción del clínquer de cemento Pórtland en los países en vías de desarrollo es la de la utilización de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínquer para la producción de bloques, por lo que es una importante motivación el estudio de los bloques producidos a partir de la utilización de

un aglomerante sobre la sustitución parcial del contenido del clínquer por la combinación de arcillas calcinadas con caliza.

1.5 Las tejas de microconcreto (TMC)

Los problemas de la vivienda en el mundo se han acrecentado dramáticamente. Cada vez existen más personas sin techo. Los métodos convencionales para la construcción de viviendas han sido ineficaces y están cada vez más alejados económicamente del alcance popular.

Para dar respuesta a estas situaciones con la vivienda, se han ido imponiendo en el Tercer Mundo el uso de materiales locales y de equipamiento constructivo mínimo, no dependiente de las complejidades tecnológicas. Se busca con esto, reducir el consumo de materiales tales como cemento, acero, elementos cerámicos y otros. También se trata de reducir el uso de energía en el proceso de producción de materiales de la construcción y de la propia construcción, lo cual traería una menor contaminación al medio ambiente (Torredemert, 1995).

El mayor problema de las viviendas de bajo costo en los países de Latinoamérica es el techo, básicamente, por los precios, pero también por la calidad y su durabilidad. Los elementos de techos más utilizados hoy son de materiales de alto costo, lo que resulta muy difícil en su adquisición, por lo que la producción de tejas de microconcreto (TMC) surge como una alternativa viable, económica y técnica. En la actualidad se fabrican varios tipos de tejas (solo la forma varía), la romana, la de canalón y la de caballete.

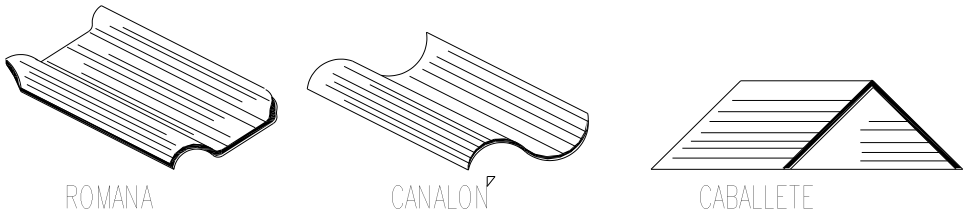


Figura 1.5 Tipos de tejas (Torredemert, 1995)

La TMC es un material de cubierta cuyas cualidades térmicas, hidráulicas, acústicas, la duración y la resistencia mecánica a los impactos están iguales o por encima de otros materiales de cubiertas ligeras. La producción de estas presentan las siguientes ventajas:

- Pueden ser producidas localmente en cualquier país.
- La tecnología es adaptable a cualquier escala de producción, incluyendo unidades para una sola persona.
- Las técnicas de fabricación pueden ser dominadas por casi cualquier persona utilizando adecuados cursos de aprendizaje.
- El comportamiento acústico y térmico de las tejas es superior al de las planchas

metálicas y de asbesto cemento.

• Las tejas requieren menos madera para su soporte en comparación con los de otras conocidas, son más baratas e igualmente duraderas.

• Comparadas con los techos de fibras naturales son más duraderos y eliminan el riesgo de incendio en ellos.

1.5.1 Los materiales que conforman el microconcreto para el caso particular de la teja

Los materiales que conforman el microconcreto para el caso particular de la teja deben ser los siguientes:

- La arena debe ser del tamaño máximo posible de acuerdo al espesor de la teja pero nunca debe pasar de 5.5 mm. La forma de la partícula debe acercarse a la esfera o al cubo, pero nunca debe utilizarse arena con forma de lámina.
- La granulometría debe estar compuesta por partículas de diferentes tamaños, pero con la menor cantidad posible de partículas muy finas.
- El contenido de arcilla y limo no debe exceder usualmente del 4%. En el caso de que se excediera en el contenido de suciedad, es necesario de algún modo eliminarla.
- Para garantizar la calidad de la teja de microhormigón (TMC) debe utilizarse en la mezcla de hormigón una relación agua – cemento entre 0.50 a 0.60.
- Cementos con un elevado contenido de silicato tricálcico.
- La reacción de hidratación del cemento con el agua se produce en la superficie. Si los granos del cemento son gruesos la reacción será muy lenta y quedarán en los granos núcleos de cemento sin reaccionar. Por lo tanto, la finura del cemento debe estar alrededor de los 3000 cm^2/gr. (300 m^2/Kg.)

La demanda de TMC con color crece de año en año. El color de la teja puede obtenerse:

- Pintándola con el inconveniente que en un tiempo más o menos largo, la pintura se va deteriorando, debido a la acción de los rayos solares, el depósito de suciedades y el crecimiento de hongos y con ello se va perdiendo la belleza del techo.
- La otra vía es agregarle un pigmento mineral a la mezcla del hormigón, con la cual se puede obtener un color permanente aunque de menor intensidad y también con el de cursar del tiempo y la influencia de los rayos solares, la suciedad y los hongos se pierde el color.

Esta tecnología ha alcanzado gran popularidad actualmente en el mundo y ya podemos mencionar que indistintamente esta siendo utilizada en 25 países de América, Asia y África, ya que este tipo de cubiertas posibilita un ambiente más fresco

en el interior de la vivienda gracias a su elevada reflectividad. Esta tecnología está apta para la autoproducción y la autoconstrucción, puede ser colocada sobre estructuras de madera o metálicas.

Tabla 1.5.1 Datos Técnicos de las tejas de microconcreto(Torredemert, 1995)

DATOS TÉCNICOS DE LAS TEJAS DE MICROHORMIGÓN	
Dimensiones.	500 x 250 mm.
Área efectiva.	400 x 200 mm.
Cantidad de tejas m^2.	12.5 tejas.
Peso de la teja. Peso por m^2 de tejas.	2.5 Kg (espesor 8mm) 31.0 Kg./m^2 (espesor 8 mm) 37.5 Kg./m^2 (espesor 10 mm)
Tejas para caballete y lateral	500 x 250 x 10 mm.
Tejas por metro lineal.	2.5 tejas
Conductividad térmica.	0.5 watt/m º C.
Peso por tejas.	2.6 Kg
Resistencia a Flexión.	Más de 60 Kg (espesor 8 mm) Más de 80 Kg (espesor 10 mm)
Resistencia al impacto de una esfera de:	220 g. a una altura de 300 mm (espesor 8 mm) 220 g. a una altura de 400 mm (espesor 10 mm)
Producción / hombre / día.	350 tejas / 2 hombre / días.
Consumo aproximado de cemento x teja	0.600 a 0.800 Kg
Consumo aproximado de arena x teja	1.6 Kg
Rendimiento / bolsa (42.5 Kg)	80 tejas.
Pendiente a utilizar en el techo.	30º (57.7 %) hasta 22º (40.4)%

El uso en microhormigones de adiciones minerales activas reduce la porosidad capilar del material, destacándose el suelo arcilloso calcinado con una disminución de más del 20% respecto a la referencia de cemento puro a los 28 días. Al parecer, la alta finura de esta puzolana influye en la estructura interna de poros capilares, lo cual provoca una mayor impermeabilidad respecto al resto de los microhormigones fabricados (Lara, 2011).

El empleo de sistemas ternarios permite extender los niveles de sustitución del clínquer en el aglomerante con respecto a los sistemas mezclados tradicionales CPO-arcillas calcinadas, por lo que es una importante motivación el estudio de tejas de microconcreto producidas a partir de la utilización de un aglomerante sobre la sustitución parcial del contenido del clínquer por la combinación de arcillas calcinadas con caliza.

1.5.2 Los moldes

Es el molde el que da forma a la teja, este hace la diferencia entre una buena teja y una mala. La función de los moldes jamás deberá ser subestimada. Para tener un buen techo es necesario tener tejas perfectamente moldeadas e idénticas para que estas acoplen perfectamente entre ellas y así el techo pueda mantener fuera la lluvia, el viento y que sea fácil de montar. Un molde debe ser idéntico a otro, liviano y resistente para su fácil manejo, y para que aumente la productividad. Los mejores moldes que existen en la actualidad son fabricados con polietileno inyectado a una presión muy alta. Estos están fabricados de tal forma que permiten ser colocados uno encima del otro, formando una cámara hermética entre ellos con lo que se logra retener el agua que contiene el mortero y que se evapora por causa de la reacción química del cemento con el agua. A los moldes se le coloca un marco de madera por varias causas, en primera para hacerlo más rígidos y no se deformen, cuidar sus esquinas para que no se rompan al caerse ocasionalmente, para que se puedan colocar uno encima del otro con facilidad y, además, asegurar la hermeticidad de la cámara de curado. Cada teja debe recibir un mínimo de tiempo de vibración (entre 30 y 50 segundos) para alcanzar los máximos esfuerzos a flexión y que resista el impacto.

Esta aplicación del microconcreto es una de las que le ha proporcionado mayor popularidad en el mundo hoy en día, muchas investigaciones giran alrededor de este material por parte de grandes investigadores en materiales, de carácter mundial, en vísperas a mejorar y optimizar su uso y generalizar más su campo de aplicación.

1.6 Conclusiones parciales

- Los factores económicos y regionales hacen necesario la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos que permitan el reemplazo parcial de significativas porciones del contenido de clínquer, manteniendo o mejorando su resistencia y durabilidad.
- El empleo de las arcillas caoliníticas calcinadas como sustituto parcial del contenido de clínquer en el CPO favorece el incremento de las propiedades físico-mecánicas en hormigones y morteros en cuanto a impermeabilidad, resistencia y durabilidad.

- Los aportes del metacaolín en las propiedades mecánicas de morteros y hormigones se concentran en la disminución de los contenidos de cal libre en las mezclas, refinamiento de la estructura de poros, reducción de la retracción química y autógena, el favorecimiento del desarrollo de la resistencia a la compresión y un mejoramiento de las propiedades durables del material.
- Los sistemas ternarios de clínquer-MK-carbonato de calcio representan un potencial para la obtención de sistemas cementicios ternarios con altos por cientos de sustitución de clínquer con respecto a los sistemas mezclados tradicionales CPO-arcillas calcinadas.
- Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificios como consecuencia de las conocidas ventajas, por lo que es una importante motivación el estudio de los bloques producidos a partir de la utilización de un aglomerante sobre la sustitución parcial del contenido del clínquer por la combinación de arcillas calcinadas con caliza.

Capítulo II: Materiales y métodos para evaluar propiedades reológicas de morteros, bloques huecos de hormigón y TMC a base de Cemento de Bajo Carbono

2.1 Generalidades

Este capítulo contiene las características de los materiales que se utilizaron y los experimentos realizados destinados a la evaluación de las características físico-mecánicas de los morteros y los hormigones producidos con Cemento de Bajo Carbono, aglomerante ternario sobre la sustitución del contenido de cemento Pórtland por un 45% de la combinación arcilla calcinada/carbonato de calcio con una relación 2:1 entre ellas; elaborado en la Fábrica de Cemento de Siguaney.

Ensayos físicos y mecánicos realizados a los morteros.

1. Consistencia mediante la mesa de sacudidas de cada una de las mezcla para cada tipo de cemento (6 mezclas – 6 consistencias).
2. Absorción de agua por capilaridad con 3 probetas (40mm x 40 mm x 160 mm) conservadas durante 28 días por cada una de las mezclas para cada tipo de cemento (18 probetas).
3. Resistencia a flexión y compresión a los 28 días con 9 probetas (40mm x 40 mm x 160 mm) por cada una de las mezclas para cada tipo de cemento (54 probetas).
4. Resistencia a la adherencia por tracción con 7 muestras de cada una de las mezclas del Cemento de Bajo Carbono (21 muestras).

Ensayos físicos y mecánicos realizados a los bloques huecos de hormigón.

- Resistencia a la compresión a los 28 días (10 bloques).
- Absorción (3 bloques).

Ensayos físicos y mecánicos realizados a las tejas de microconcreto.

- Resistencia a la flexión a los 28 días.
- Permeabilidad a los 28 días.
- Peso y dimensiones

2.2 Diseño experimental

En el diseño experimental para evaluar la influencia del Cemento de Bajo Carbono en las propiedades físico-mecánicas de morteros y hormigones se siguió el siguiente plan experimental.

1. Selección y procesamiento de la materia prima para la producción de morteros, hormigones y microhormigones.
2. Caracterización de la materia prima.
3. Diseño y fabricación de mezclas de morteros para la dosificación fijada.

4. Producción de probetas (40mm x 40 mm x 160 mm) de morteros para la realización de ensayos de:
   - Resistencia a flexión y compresión a los 28 días.
   - Absorción de agua por capilaridad pasado los 28 días.
5. Producción de muestras de morteros para la realización de ensayos de:
   - Resistencia a la adherencia por tracción.
   - Consistencia o fluidez del mortero fresco.
6. Fabricación de TMC y realización de ensayos de:
   - Resistencia a la flexión a los 28 días.
   - Permeabilidad a los 28 días.
   - Peso y dimensiones.
7. Fabricación de los bloques huecos de hormigón y realización de ensayos de:
   - Resistencia a la compresión a los 28 días.
   - Absorción.
8. Determinación de los parámetros físico-mecánicos a las edades especificadas.
9. Valoración de los resultados obtenidos.

2.3 Caracterización y preparación de las materias primas para la producción de los morteros

2.3.1 Hidrato de cal

El hidrato de cal utilizado fue obtenido de un almacén de la misma Universidad. El cual fue secado en una estufa marca Venticell por 24 horas a una temperatura de 105ºC para que perdiera la humedad obtenida durante los días que permaneció en el lugar de almacenamiento. Este proceso se realizó en los laboratorios de la facultad y posteriormente se tamizó por el tamiz # 16. En la tabla # 2.1 se muestran los resultados del análisis químico.

Figura 2.1 Secado del hidrato de cal en la estufa

Tabla 2.1: Resultados del análisis químico del hidrato de cal. Ensayos realizados por el Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de la Construcción (CTDMC) de La Habana.

Ensayos	UM	Resultados			Normas
		1	2	Prom.	
Determinación Dióxido de Silicio (SiO_2)	%	2,12	2,08	2,10	NC 54-35/86
Determinación de Óxido Férrico ($Fe_2 O_3$)	%	1,91	1,91	1,91	NC 54-339/86
Determinación del Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	%	3,66	3,66	3,66	54-338/86
Determinación del Óxido de Calcio (CaO)	%	54,91	54,91	54,91	NC 54-341/86
Determinación del Óxido de Magnesio (MgO)	%	2,12	2,12	2,12	NC 54-337/86
Determinación del Trióxido de azufré (SO_3)	%	0,12	0,14	0,14	NC 54-05/85
Determinación de la Perdida por Ignición(PPI)	%	30,93	30,95	30,94	NC 054-004/85
Determinación del Carbonato de Magnesio	%	3,60	3,60	3,60	NC 54-27: 1985
Determinacion de la Humedad	%	0,82	0,79	0,80	NC 44-20: 72
Determinación del Carbonato de Calcio	%	98,05	98,05	98,05	NC 44-20/72
Determinación Óxido de Calcio e Hidrato de Calcio. Determinación Volumétrica del por ciento Aprovechable.	%	41,44	41,44	41,44	NC 54-279/1984

El hidrato de cal antes estudiado presenta un índice de calidad tipo 3, evaluado según la NC 54-286:84 según su contenido de CaO.

2.3.2 Árido fino

La arena utilizada fue acopiada de una obra en la calle San Pedro del municipio de Santa Clara, la cual estaba dedicada a la construcción de 14 viviendas. Esta arena es procedente de la cantera Sergio Soto también conocida como El Hoyo, en la provincia de Villa Clara.

Tabla 2.2: Características físico-mecánicas de los áridos finos de la cantera Sergio Soto (El Hoyo). Ensayos realizados por la ENIA.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones	Incertidumbre
Material más fino que el tamiz 200	**%**	**6.68 ****	**≤ 5**	**± 0.15**
Partículas de arcilla	**%**	**3.43 ****	**≤ 1**	**± 0.17**
Peso Específico Corriente	**g/cm³**	**2.64 ***	**≥ 2.5**	**± 0.21**
Peso Específico Saturado	**g/cm³**	**2.66**	**---**	**± 0.20**
Peso Específico Aparente	**g/cm³**	**2.70**	**---**	**± 0.20**
Absorción	**%**	**0,9 ***	**≤ 3.0**	**± 0.16**
Masa Volumétrica Suelta	**kg/m³**	**1491**	**---**	**± 28.02**
Masa Volumétrica Compactada	**kg/m³**	**1600**	**---**	**± 28.02**
Nota : * Conforme y ** No Conforme				

Tabla 2.3: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	PULG	% Pasado	Especificaciones
9,52	3/8''	100 *	100
4,76	No. 4	100 *	90 – 100
2,38	No.8	88 *	70 – 100
1,19	No.16	62*	45 – 80
0,59	No.30	39 *	25 – 60
0,297	No.50	23 *	10 – 30
0,149	No.100	11 **	2 – 10
Incertidumbre : ± 1.10 Nota : * Conforme y ** No Conforme			

Se considera que el árido no es conforme, ya que el árido en el caso de la granulometría es no conforme si al menos en un tamiz el porciento pasado no satisface las especificaciones, además no cumple con el ensayo de partículas de arcilla ni con el ensayo de material más fino que el tamiz 200.

2.3.2.1 Árido fino para la producción de muestras a utilizar en el ensayo de resistencia a la adherencia

La arena de las muestras para el ensayo de adherencia por tracción utilizada fue acopiada en La Habana. Esta arena es procedente de la cantera Victoria III de la misma provincia.

Tabla 2.4: Características físico – mecánicas de los áridos finos de la cantera Victoria III. Ensayos realizados por el CTDMC correspondientes a la arena.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones	Incertidumbre
Material más fino que el tamiz 200	%	1.8 *	≤ 5	± 0.58
Partículas de arcilla	%	0*	≤ 1	± 0.5
Peso Específico Corriente	g/cm³	2.56 *	≥ 2.5	± 0.51
Peso Específico Saturado	g/cm³	2.59	---	± 0.51
Peso Específico Aparente	g/cm³	2.66	---	± 0.51
Absorción	%	1.47 *	≤ 3.0	± 0.59
Masa Volumétrica Suelta	kg/m³	1440	---	± 1.24
Masa Volumétrica Compactada	kg/m³	1566	---	± 1.24
Nota: * Conforme y ** No Conforme. Incertidumbre expandida con k= 2				

Tabla 2.5: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	**PULG**	**% Pasado**	**Especificaciones**
9,52	**3/8''**	**100 ***	**100**
4,76	**No. 4**	**97***	**90 – 100**
2,38	**No.8**	**74***	**70 – 100**
1,19	**No.16**	**41***	**45 – 80**
0,59	**No.30**	**17****	**25 – 60**
0,297	**No.50**	**7****	**10 – 30**
0,149	**No.100**	**2***	**2 – 10**
Incertidumbre : ± 1.66 **Nota : * Conforme y ** No Conforme**			

Se considera que el árido no es conforme, ya que el árido en el caso de la granulometría es no conforme si al menos en un tamiz el porciento pasado no satisface las especificaciones, aunque cumple con los demás párametros.

2.3.3 Propiedades físico–mecánicas de los aglomerantes

Los aglomerantes usados en los morteros fueron el LCC y el PP-250. El LCC se produjo en la Fábrica de Cemento de Siguaney y posteriormente de almacenado en silos metálicos se ensacó y el PP-250 se adquirió de una bolsa sellada de la misma fábrica.

Tabla 2. 6: Propiedades físicas del Cemento de Bajo Carbono.

					`	Tiempo fraguado		
Institución	**Finura Tamiz 4900 % ret**	**Blaine cm²/g**	**p. espec (g/cm³)**	**consist normal %**	**minicono (%_ref.P35)**	**inicial (min)**	**final (hr)**	**Estabil. Vol. (mm)**
Fábrica Siguaney	**12,0**	**4190**	**2,92**	**25,0**	**x**	**135**	**2,92**	**0,30**
GECEM	**12,0**	**5085**	**2,95**	**25,2**	**x**	**94**	**2,73**	**0,40**
CTDMC	**14,4**	**3619**	**2,91**	**24,1**	**76,1**	**128**	**3,35**	**x**

Tabla 2. 7: Propiedades mecánicas del Cemento de Bajo Carbono.

	Resistencia compresión Mpa		
Institución	**3d**	**7d**	**28d**
Fábrica Siguaney	**11,0**	**17,5**	**30,3**
GECEM	**10,7**	**16,2**	**29,7**
CTDMC	**10,4**	**18,9**	**31,8**
ENIA VC	**x**	**18,4**	**27,6**

Tabla 2. 8: Propiedades físicas del Cemento PP-250.

				Tiempo fraguado	
Institución	**Finura Tamiz 4900 % ret**	**p. espec (g/cm³)**	**consist normal %**	**inicial (min)**	**final (hr)**
ENIA VC	**7,0**	**2,8**	**26,9**	**210**	**4,45**

Tabla 2. 9: Propiedades mecánicas del Cemento PP-250.

Institución	**Resistencia (Mpa)**		**Especificaciones**
ENIA VC	**Resistencia a Compresión a 7 días**	**21.4***	**≥17**
	Resistencia a la Flexo-tracción a 7 días	**6.1**	
	Resistencia a Compresión a 28 días	**30.3***	**≥25**
	Resistencia a la Flexo-tracción a 28 días	**7.9**	
	Nota : * Conforme y ** No Conforme		

2.3.4 Agua

En este caso se utilizó agua potable como lo especifica la norma NC 353 “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros – Especificaciones.”

2.4 Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón

2.4.1 Árido grueso

Para la fabricación de los bloques huecos de hormigón se utilizó granito procedente de la cantera Mariano Pérez Valí (El Purio) de 10 mm-5 mm.(Ver tabla 2.10)

Tabla 2.10: Ensayos realizados por la ENIA correspondientes al Granito.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	0,69	≤ 1.0
Partículas de arcilla	%	0,03	≤ 0.25
Partículas plano alargadas	%	1,3	≤ 10
Peso Específico Corriente	g/cm³	2,54	≥ 2.5
Peso Específico Saturado	g/cm³	2,57	---
Peso Específico Aparente	g/cm³	2,64	---
Absorción	%	1,6	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m³	1400	---
Masa Volumétrica Compactada	kg/m³	1527	---

Tabla 2.11: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	PULG	% Pasado	Especificaciones
12,7	½''	100*	100
9,52	3/8''	96*	85-100
4,76	No.4	32*	15 – 35
2,38	No.8	6*	0 – 10
1,19	No.16	0*	0 – 5
Incertidumbre : ± 0.74 Nota : * Conforme y ** No Conforme			

Se considera que el árido si es conforme con el ensayo granulométrico y con todos los demás ensayos según Norma Cubana 251:2005 "Áridos para hormigones hidráulicos-Requisito".

2.4.2 Árido fino

La arena utilizada es procedente de la cantera Sergio Soto (El Hoyo), en la provincia de Villa Clara, esta es una arena beneficiada. (Ver tabla 2.12)

Tabla 2. 12: Características físico – mecánicas de los áridos finos (El Purio).

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	4.19*	≤ 5
Partículas de arcilla	%	1.55**	≤ 1
Peso Específico Corriente	g/cm³	2.61*	≥ 2.5
Peso Específico Saturado	g/cm³	2.64	---
Peso Específico Aparente	g/cm³	2.69	---
Absorción	%	1.1*	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m³	1309	---
Masa Volumétrica Compactada	kg/m³	1582	---
Nota: * Conforme y ** No Conforme			

Tabla 2.13: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	PULG	% Pasado	Especificaciones
9,52	3/8''	100 *	100
4,76	No. 4	100*	90 – 100
2,38	No.8	86*	70 – 100
1,19	No.16	56*	45 – 80
0,59	No.30	34*	25 – 60
0,297	No.50	21*	10 – 30
0,149	No.100	11**	2 – 10
Incertidumbre : ± 1.66 Nota : * Conforme y ** No Conforme			

Se considera que el árido no es conforme, ya que el árido en el caso de la granulometría es no conforme si al menos en un tamiz el porciento pasado no satisface las especificaciones, además no cumple con el ensayo de partículas de arcilla.

2.4.3 Polvo de piedra

El polvo de piedra utilizado es procedente de la cantera conocida como Palenque en la provincia Villa Clara, sus características físicas mecánicas se muestran a continuación: (Ver tabla 2.14)

Tabla 2.14: Características físico – mecánicas del polvo de piedra (Palenque).

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el tamiz 200	%	15.59**	≤ 7
Partículas de arcilla	%	3.91**	≤ 1
Peso Específico Corriente	g/cm³	2.65*	≥ 2.5
Peso Específico Saturado	g/cm³	2.7	---
Peso Específico Aparente	g/cm³	2.78	---
Absorción	%	1.7*	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m³	1418	---
Masa Volumétrica Compactada	kg/m³	1636	---
Nota: * Conforme y ** No Conforme			

Tabla 2.15: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	PULG	% Pasado	Especificaciones
9,52	3/8''	100*	100
4,76	No. 4	99*	90 - 100
2,38	No.8	70*	70 - 100
1,19	No.16	46*	45 - 80
0,59	No.30	28*	25 - 60
0,297	No.50	17*	10 - 30
0,149	No.100	11**	2 - 10
0,074	No.200	7*	5 - 7
Incertidumbre : ± 1.66 Nota : * Conforme y ** No Conforme			

Se considera que el árido no es conforme ya que no cumple con el ensayo granulométrico y además no cumple tampoco con el ensayo de partículas de arcilla ni con el ensayo de material más fino que el tamiz 200 y aunque sí cumple con todos los demás ensayos según la NC 251:2005 “Áridos para hormigones hidráulicos-Requisitos”.

2.5 Caracterización del árido para la producción de TMC

La arena utilizada es procedente de la cantera Mariano Pérez Valí también conocida como El Purio, en la provincia de Villa Clara. Se obtiene producto de la trituración de

las rocas de origen calizo, sus características físico-mecánicas se muestran a continuación.

Tabla 2.16: Características físico – mecánicas de los áridos finos (El Purio). Ensayos realizados por la ENIA correspondientes a la arena de roca triturada.

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones	Incertidumbre
Material más fino que el tamiz 200	**%**	**3.73 ***	**≤ 5**	**± 0.16**
Partículas de arcilla	**%**	**0.52 ***	**≤ 1**	**± 0.18**
Peso Específico Corriente	**g/cm³**	**2.59 ***	**≥ 2.5**	**± 0.02**
Peso Específico Saturado	**g/cm³**	**2.63**	**---**	**± 0.019**
Peso Específico Aparente	**g/cm³**	**2.70**	**---**	**± 0.019**
Absorción	**%**	**1.6 ***	**≤ 3.0**	**± 0.17**
Masa Volumétrica Suelta	**kg/m³**	**1618**	**---**	**± 28.02**
Masa Volumétrica Compactada	**kg/m³**	**1873**	**---**	**± 28.03**
Nota : * Conforme y ** No Conforme				

Tabla 2.17: Análisis granulométrico.

Tamices			
mm	**PULG**	**% Pasado**	**Especificaciones**
9,52	**3/8''**	**100 ***	**100**
4,76	**No. 4**	**99***	**90 - 100**
2,38	**No.8**	**82***	**70 - 100**
1,19	**No.16**	**59***	**45 - 80**
0,59	**No.30**	**35***	**25 - 60**
0,297	**No.50**	**18***	**10 - 30**
0,149	**No.100**	**6***	**2 - 10**
Incertidumbre : ± 1.66 **Nota : * Conforme y ** No Conforme**			

Se considera que el árido si es conforme con el ensayo granulométrico y con todos los demás ensayos según Norma Cubana 251:2005 “Áridos para hormigones hidráulicos-Requisito”.

2.6 Fabricación de mezclas para morteros. Elaboración de las probetas de morteros

Las mezclas para los morteros se elaboraron en la ENIA. Una vez que todos los materiales estaban preparados para la mezcla se midieron de acuerdo a la dosificación deseada en un recipiente bien tarado de 4,20 kg y se pesaron para convertir la dosificación volumétrica a una gravimétrica. El mezclado fue de forma manual en un vagón y primeramente se hizo un mezclado en seco para la homogenización de la mezcla, la cual se logró cuando el color de la mezcla fue homogéneo. Después se vertió el agua a intervalos para hacer más fácil el mezclado y para evitar el exceso de agua en el mortero. Seguido a esto, se realizó el ensayo de fluidez en la mesa de sacudidas para comprobar si la cantidad de agua era correcta.

Figura 2.2 Probetas de morteros.

Figura 2.3 Eleboración de morteros.

Previo a la elaboración de las mezclas de morteros se limpiaron todos los moldes, se cerraron bien y se engrasaron todas las paredes incluyendo las bases. Ya lista la mezcla, se vertió una porción representativa de la muestra de mortero en cada compartimento del molde para formar una primera capa que se compactó en toda su superficie con 25 golpes suaves y homogéneos como lo expresa la NC 173: 2002 “Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión”. Después se vertió el resto del material y se repitió la operación de apisonado. Se eliminaron los espacios vacíos que habían quedado y cuando el mortero comenzaba a endurecer se enrasó el molde con una superficie metálica.

Se elaboraron 6 mezclas de morteros, 3 dosificaciones diferentes para el cemento LCC y 3 para el cemento PP-250. En la siguiente Tabla 2.18 se muestran los detalles.

Tabla 2.18 Dosificaciones de los morteros y fluidez obtenida.

		Dosificación gravimétrica (Kg)					
Muestra No.	Dosificación Volumétrica	Cemento LCC	Cemento PP-250	Arena beneficiada	Hidrato de cal	Agua(L)	Fluidez(mm)
1	1-6-2	3.000		23.700	3.650	5.000	190
2	1-6-2		3.100	23.550	3.600	5.200	195
3	1-5-1	3.280		21.548	1.820	4.000	185
4	1-5-1		3.125	19.625	1.825	4.000	195
5	1-4-1	2.975		15.800	1.800	3.500	190
6	1-4-1		3.115	15.700	1.815	3.500	185

2.6.1 Determinación de consistencia en la mesa de sacudidas

El ensayo de consistencia o fluidez del mortero fresco empleando la mesa de sacudidas se realiza según plantean la norma NC 170: 2002 "Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas." Por este medio se obtiene la cantidad de agua necesaria para la preparación de morteros de albañilería que serán empleados en la colocación de elementos de pared y/o revestimientos de paredes y techos.

La consistencia se determinó midiendo el aumento del diámetro producido en una muestra de cada dosificación de cada mortero fresco moldeado, en un molde tronco-cónico de dimensiones determinadas cuando la mesa de sacudidas se elevó y se dejó caer desde una altura de 12,7 mm, 25 veces en 15 s, girando la manivela con una velocidad constante**.** (Ver figura 2.4)

Figura 2.4 Mesa de sacudidas**.**

2.7 Fabricación de bloques huecos de hormigón

Se realizó la producción de los bloques huecos de hormigón en el Taller: ''Materiales Alternativos de la Construcción'' del municipio de Manicaragua en la provincia de Santa

Clara, en el cual se utilizó las materias primas caracterizadas anteriormente. En este taller se utiliza una máquina estacionaria de hacer bloques fabricada en nuestro país compuesta por una estructura metálica de vigas y angulares básicamente, así como los elementos, moldes y mecanismos que permiten el vertido, el zarandeo y la compactación de la mezcla. También es parte de esta un motor eléctrico trifásico para lograr el funcionamiento del mecanismo de vibración en la mesa vibratoria, lo cual logra la compactación de los bloques dentro de los moldes y su posterior remoción con el mecanismo botador hacia las parrillas para el traslado al secado de los mismos.

Las mezclas para la producción de estos bloques fueron fabricadas en una hormigonera basculante, luego se vertió en el suelo cerca de la máquina de hacer bloques y se paleó en la cajuela de la máquina para la producción de los diferentes tipos de bloques. Los bloques una vez terminado el proceso de producción se retiran encima de palets de madera, los cuales se trasladan con dos hombres para su posterior secado y curado. El curado es llevado a cabo rociándole agua a cada uno de los bloques durante 48 horas, ya sea a cubos o regándolos con una manguera.

Figura 2.5 Máquina de hacer bloques y hormigonera basculante.

Figura 2.6 Bloques huecos de hormigón de 10 mm de espesor.

Tabla 2.19: Dosificación utilizada en el Taller: ‘‘Materiales Alternativos de la Construcción’’ del municipio de Manicaragua para la fabricación de bloques huecos de hormigón.

Dosificación Volumétrica			
Cemento LCC	**Arena beneficiada**	**Polvo Piedra**	**Granito**
1	**2**	**1**	**5**
1	**2**	**1/2**	**4**
1	**2**	**1/2**	**4**

Inicialmente se utilizó en este taller las dosificaciones mostrada en la Tabla # 2.19, pero al esperar 48 horas para retirarlos de los palets, no adquirían la resistencia

esperada a ese tiempo. Entonces se adoptó la dosificación mostrada en la Tabla # 20, esperando aún 48 horas para retirarlos.

Tabla 20: Dosificación obtenida en el Taller: ‘‘Materiales Alternativos de la Construcción’’ para la fabricación de bloques huecos de hormigón.

Dosificación Volumétrica			
Cemento LCC	**Arena beneficiada**	**Polvo Piedra**	**Granito**
$\mathbf{1\frac{1}{2}}$	**4**	**1**	**5**

Con esta máquina de hacer bloques se puede lograr según los fabricantes de 1000 a 2000 bloques de 10 mm de espesor en 8 horas de trabajo y en este taller se producen diario de 500 a 600 bloques de este espesor, lo cual está por debajo del rendimento deseado; aunque según plantea el jefe de producción del taller pueden duplicar la poducción si tuvieran un adecuado abastecimiento de materiales.

2.8 Fabriación de tejas de microconcreto

Para la elaboración de las tejas de microconcreto se utilizó el Cemento de Bajo Carbono y la arena artificial de la cantera conocida como El Purio. Las mezclas se elaboraron de forma manual con un vagón en el taller de materiales para la construcción del municipio de Quemado de Güines. Previo a la eleboración de estas mezclas se limpiaron todos los moldes y los nylons, escogiéndose los de mejor estado.

Para obtener la dosificación deseada se utilizaron los recipientes bien tarados (5 L, 2 L y 1 L) del laboratorio de la facultad. La dosificación escogida fue de 1: 2 ½, siendo 1 la fracción de cemento y se añadió el agua de forma tal que se obtuviera aproximadamente una relación de a/c = 0,41, sabiendo ya cuánto pesaban los recipientes tarados llenos de cemento porque habían sido pesados en una balanza digital en el laboratorio de la facultad. Para este trabajo se elaboraron un total de 26 tejas en este municipio y se sumaron 6 tejas producidas en el municipio de Manicaragua.

Figura 2.7 Elaboración de las tejas.

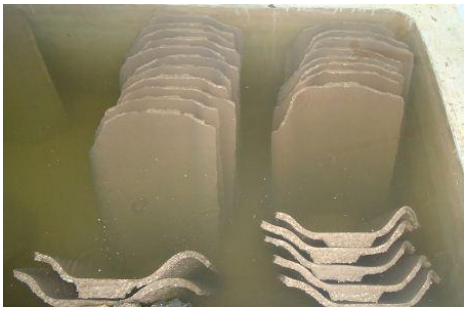


Figura 2.8 Curado de las tejas.

2.9 Descripción de los ensayos realizados a las probetas de morteros

2.9.1 Determinación de la resistencia a flexión y compresión

La resistencia a flexión viene dada por la carga necesaria para romper cada probeta en dos mitades y la resistencia a compresión se determina a continuación sobre cada una de las mitades mediante la aplicación de una carga uniformemente repartida hasta la rotura.

El ensayo de resistencia a flexión y compresión se realiza según plantean las normas NC 173: 2002 "Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión".

Fueron fabricadas para la realización de este ensayo 9 probetas para cada una de las dosificaciones fijadas para cada tipo de cemento con rotura a la edad de 28 días (total = 54 probetas prismáticas).

Figura 2.9 Prensa hidráulica con dispositivo para el ensayo de flexión.

Figura 2.10 Prensa hidráulica con dispositivo para el ensayo de compresión.

2.9.2 Determinación de la absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se realiza según plantea la norma NC 171: 2002 "Mortero endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad". La absorción de agua por capilaridad es una propiedad que no está completamente definida en los morteros de albañilería. En ocasiones se confunde con la permeabilidad, cuando se determina principalmente en morteros de recubrimiento, se produce al existir una diferencia de presión dentro de los capilares, lo cual provoca que el agua ascienda por su interior. A más fino y largo el capilar la absorción será mayor.

Para este ensayo se fabricaron probetas prismáticas de morteros de 40 mm x 40 mm x 160 mm de acuerdo a lo planteado por la NC 173: 2002 "Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión". Una vez curadas a 27ºC ± 2ºC y a un 90% de humedad relativa aproximadamente, durante 28 días, fueron pesadas a las edades de 4 h; 8 h; 1; 3; 5 y 7 días. Seguido se colocaron en posición vertical, o sea por su cara de 40 mm x 40 mm sobre un lecho de arena fina de no más de 10 mm

de espesor en un recipiente estanco que contenía una altura de agua por encima del lecho de arena de aproximadamente 5 mm. Para mantener el nivel agua en el recipiente se llenó una probeta de agua y se colocó en posición invertida a 5 mm sobre el lecho de arena como lo plantea la norma.

Figura 2.11 Ensayo de absorción.

Fueron fabricadas para la realización de este ensayo 3 probetas para cada una de las dosificaciones fijadas para cada tipo de cemento conservadas a la edad de 28 días (total = 18 probetas prismáticas).

Luego de obtenidos todos los resultados se siguió el procedimiento establecido en la norma antes mencionada, para la determinación de todos los parámetros que caracterizan al proceso de absorción.

2.9.3 Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción

La adherencia se define como la resistencia a tracción máxima de la unión entre un mortero y un soporte definido y se determina por un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero. La fuerza de tracción se aplica por medio de una chapilla de arrancamiento unida al área de ensayo de la superficie del mortero y la adherencia o resistencia de unión se determina dividiendo la carga máxima obtenida entre el área de ensayo.

El ensayo de resistencia a la adherencia por tracción se realiza según plantea la norma NC 172: 2002 “Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción”.

Para este ensayo se elaboraron 7 muestras por cada dosificación fijada de Cemento de Bajo Carbono (total = 21 muestras). Estas muestras fueron colocadas en grupos de 5 sobre baldosas hidráulicas de 50 cm x 50cm y en grupos de 2 sobre baldosas hidráulicas de 25 cm x 25cm, de forma tal que la separación entre ellas no fuese menos de 50 mm para que no interfiera en la realización del ensayo. La chapilla de arrancamiento era de forma circular con un área de 60 mm de diámetro y se pegó con resina epóxica. La fuerza aplicada sin sacudidas, fue con una velocidad uniforme y continua con una duración entre los 10 s y 80 s.

Figura 2.12 Muestras para el ensayo de adherencia.

Figura 2.13 Equipo para el ensayo de adherencia.

2.10 Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón

2.10.1 Resistencia a compresión

Para este ensayo se eliminaron las irregularidades o los excesos que poseían los bloques y se aplicó una capa de nivelación sobre la superficie de carga y apoyo del bloque de mortero. Se puso en contacto la cara superior del bloque suavemente con el plato superior de la máquina para evitar que se produjeran impactos.

Para el ensayo de resistencia a la compresión se aplicó una carga de velocidad constante de 5 KN/s en el sentido longitudinal hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura.

2.10.2 Absorción

El ensayo de absorción se realizó con el objetivo de determinar la capacidad de los bloques para absorber una determinada cantidad de agua, donde deberán cumplir con los valores máximos según la categoría de estos, fijados en la norma. Se determina colocando los bloques en la estufa 24 horas a una temperatura aproximadamente de 100ºC y luego pesándolos, después se colocan en un recipiente lleno de agua por 24 horas para determinar el peso húmedo y la diferencia de ambos pesos muestra el porciento de absorción que es capaz de absorber cada bloque.

2.11 Descripción de los ensayos realizados a las tejas de microconcreto

2.11.1 Ensayo de resistencia a flexión

Para garantizar una uniformidad en la calidad de las tejas producidas se realiza el ensayo de flexión. Este ensayo se realiza con un equipo que funciona como una prensa que está especialmente diseñado para ensayar tejas de microconcreto, en condiciones de laboratorio o de taller artesanal, de acuerdo al Manual para el Control de Calidad, Elemento 235 de SKAT, Ensayo L 4.3.20.

Se colocó la teja a ensayar debajo de la cuchilla de aplicación de la carga ajustándola de forma tal que el perfil de la cuchilla coincidiera con el perfil de la teja. Se ajustó el tornillo de regulación hasta que la palanca llegó a estar perfectamente horizontal y la carga se aplicó dándole vuelta a la manivela.

Cuando se rompió la teja se leyó en el reloj situado en el centro del equipo la carga de rotura.

Figura 2.14 Ensayo de resistencia a flexión

2.11.2 Ensayo de permeabilidad

Para este ensayo se colocó dos tapas de mortero formando un recipiente que toman la forma de la sección de la teja para contener el agua. Se le agregó agua a este canal y se observó después de las 24 horas para ver si aparecían gotas en la cara inferior de la misma o signos de humedad en algunas de las áreas de las tejas.

2.11.3 Ensayo del peso

La determinación del peso de las tejas es una forma fácil de controlar sus dimensiones, especialmente el espesor. En este caso se dejó secar durante 24 horas y se pesaron, observando el resultado que no se diferenciara en más del 10% del peso esperado.

2.12 Conclusiones Parciales

- El cemento ternario a base de clínquer-arcilla calcinada-carbonato de calcio con un 45% de sustitución del clínquer, conocido como LCC, utilizado en la elaboración de los morteros y hormigones muestra un lento fraguado debido a su elevado por ciento de sustitución de los minerales que reaccionan rápidamente con el agua.
- El empleo del Cemento de Bajo Carbono en los morteros de albañilería, en los bloques huecos de hormigón y en las tejas de microconcreto provoca una baja resistencia inicial, por lo que se necesita esperar más tiempo para desencofrar o desmoldar estos elementos comparado con el CPO.

- En los morteros de albañilería el uso del Cemento de Bajo Carbono presenta similar laborabilidad que haciendo uso del cemento PP-250.
- La materia prima para elaborar productos para la construcción de edificaciones proveniente de las canteras de la provincia de Santa Clara no están cumpliendo con lo establecido en las normas cubanas, por lo que sería conveniente someterlas a un análisis antes de utilizarlas.

Capítulo III: Análisis de los resultados

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados de los ensayos realizados a las probetas prismáticas de morteros producidas a base de Cemento de Bajo Carbono producido en la Fábrica de Cemento de Siguaney, aglomerante formulado de manera conjunta por especialistas del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) y del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), Suiza; con el fin de determinar sus propiedades físico-mecánicas. Además se realiza una comparación entre los resultados de las muestras a base de LCC y las muestras haciendo uso del Cemento PP-250. También se evalúan los resultados de la utilización de este aglomerante en la conformación de bloques huecos de hormigón y tejas de microconcreto.

3.1 Análisis de los resultados de los ensayos realizados a los morteros

3.1.1 Análisis de los resultados de los ensayos de resistencia a flexión y compresión a probetas prismáticas de morteros

Luego de fabricadas las mezclas descritas en el capítulo anterior y confeccionado todas las muestras necesarias se realizó los ensayos de resistencia a flexión y compresión a la edad de 28 días. En la siguiente tabla se muestran los valores medios de resistencia a flexión obtenidos para cada tipo de cemento. (Ver tabla 3.1)

Tabla 3.1: Resultados de la resistencia a flexión y compresión de las probetas prismáticas de morteros a la edad de 28 días.

		Dosificación		
Tipo de Cemento	**Ensayos**	**(1-5-1)**	**(1-4-1)**	**(1-6-2)**
LCC	**Flexión**	**1,79**	**3,07**	**1,4**
	Compresión	**4,84**	**6,93**	**3,62**
PP-250	**Flexión**	**3,17**	**4,06**	**2,5**
	Compresión	**8,11**	**9,48**	**5,36**

En el siguiente gráfico se puede observar mejor el comportamiento de cada uno de los morteros producidos con estos aglomerantes, así como el cumplimiento de estos con lo expresado en las normas cubanas (Ver Figura 3.1).

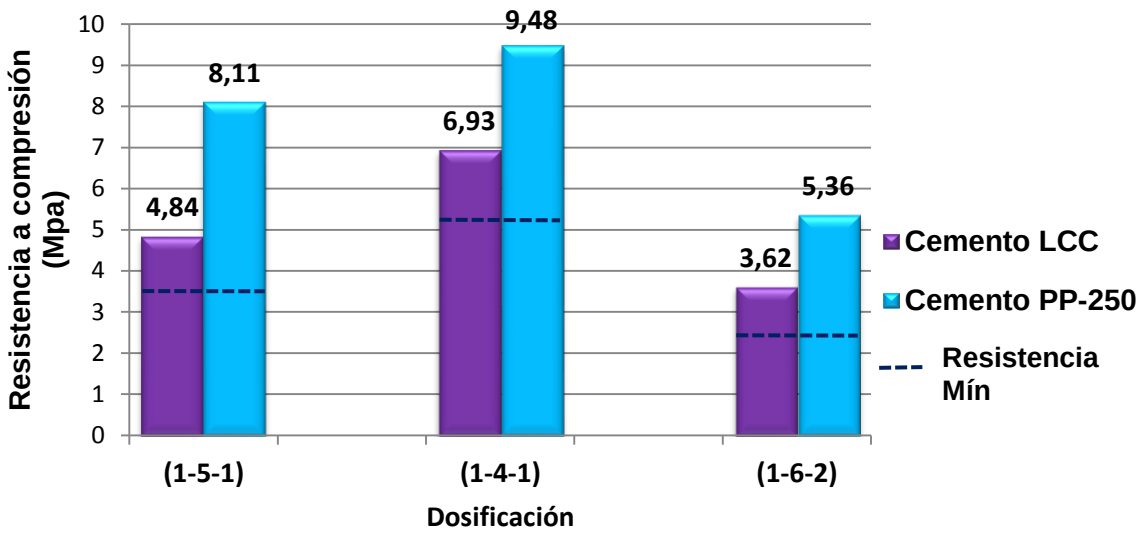


Figura 3.1 Comportamiento de la resistencia a compresión de los morteros a la edad de 28 días.

Como se puede observar en este gráfico los morteros producidos con LCC presentan significativamente más baja resistencia a la compresión que los producidos con PP-250, posiblemente debido al gran porciento de sustitución de adición activa, pero este cumple satisfactoriamente a los 28 días con la resistencia establecida por la NC 175: 2002 “Morteros de albañilería. Especificaciones”. La cual especifica que para morteros tipo I la resistencia media mínima a la compresión debe ser superior a 2,4 Mpa, mientras que para el tipo II y III mayor que 3,5 Mpa y 5,2 Mpa respectivamente.

De igual forma se nota la significativa baja resistencia a la flexión en el siguiente gráfico. (Ver Figura 3.2)

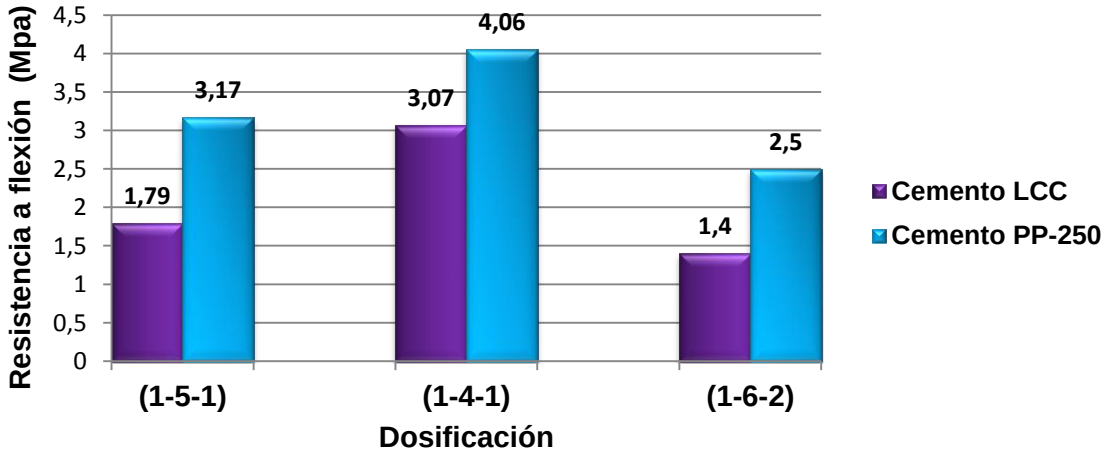


Figura 3.2 Comportamiento de la resistencia a flexión de los morteros a la edad de 28 días.

3.1.2 Análisis de los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad a las probetas de morteros

La absorción de agua por capilaridad es una propiedad que no esta completamente definida en los morteros de albañilería. En ocasiones se confunde con la permeabilidad, cuando se determina principalmente en morteros de recubrimiento, se produce al existir una diferencia de presión dentro de los capilares, lo cual provoca que el agua ascienda por su interior. A más fino y largo el capilar la absorción será mayor.

Expresado ya con anterioridad para este ensayo se seleccionaron 3 muestras de cada una de las mezclas para los distintos cementos. A las mismas se les realizó el ensayo como indica la NC 171: 2002 “Mortero endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad”. Los resultados se muestran en la siguiente tabla. (Ver tabla 3.2)

Tabla 3.2: Resultados de la absorción del agua por capilaridad de las probetas prismáticas de morteros.

		Edad						
Cementos	**Dosificación**	**0 h**	**4 h**	**8 h**	**1día**	**3día**	**5día**	**7día**
LCC	**(1-5-1)**	**505,03**	**525,33**	**530,52**	**541,09**	**545,64**	**548,83**	**549,43**
	(1-4-1)	**501,80**	**514,97**	**519,85**	**530,89**	**537,55**	**540,34**	**541,09**
	(1-6-2)	**475,71**	**489,27**	**494,02**	**504,40**	**510,68**	**513,71**	**514,62**
PP-250	**(1-5-1)**	**500,93**	**510,61**	**514,48**	**524,04**	**529,27**	**530,81**	**531,36**
	(1-4-1)	**493,75**	**503,60**	**508,25**	**519,43**	**525,20**	**526,98**	**527,11**
	(1-6-2)	**494,13**	**503,74**	**508,04**	**518,29**	**524,27**	**526,40**	**526,55**

En el siguiente gráfico se puede observar mejor el crecimiento de las masas de estos morteros producidos con estos aglomerantes, y así poder establecer de este modo una comparación de los mismos. (Ver Figura 3.3)

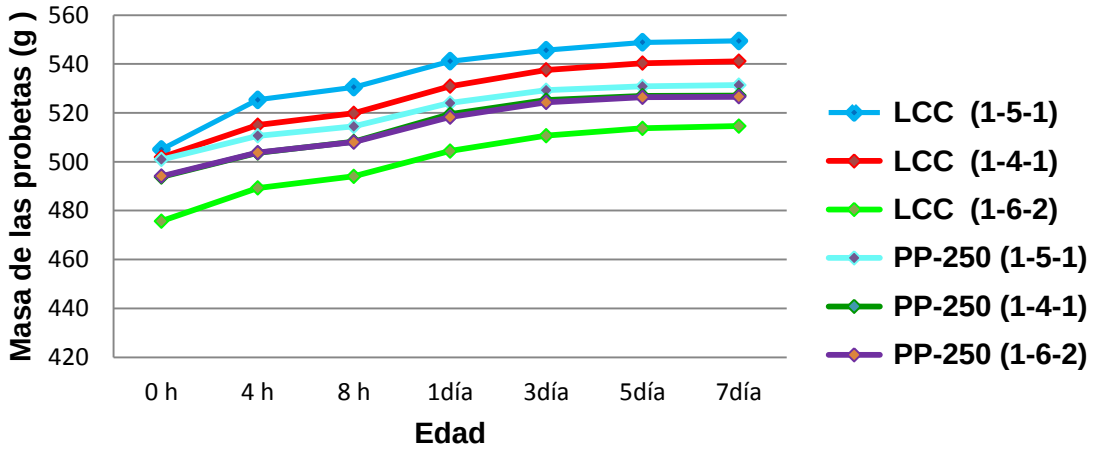


Figura 3.3 Comportamiento de la masa de las probetas de morteros.

Como se puede apreciar en la Figura 3.3 los morteros elaborados con LCC presentan un mayor peso por unidad de superficie, efecto provocado por el agua absorbida por capilaridad, cuando a las probetas se las sumerge por una de sus bases menores. Pudiéndose observar que a medida que aumenta la cantidad de árido e hidrato de cal, o sea, la dosificación 1-6-2 de ambos cementos es menor el peso en comparación con todas las demás. Esto puede ser provocado por el efecto filler que introduce la cantidad de hidrato de cal, lo cual disminuye la porosidad y por tanto dismuye la absorción.

Para calcular la verdadera absorción de agua por capilaridad de estos morteros se utilizó la siguiente expresión:

$$Absorción\ por\ capilaridad\ = \frac{Pfinal - Pinicial}{16}\ (\mathrm{g/\ cm^2})$$

- :P final - Masa de la probeta a la edad del ensayo en gramos
- P inicial - Masa de la probeta antes de sumergirse en el agua en gramos

Y el # 16 viene del área de una de las bases de la probeta prismática

En el siguiente gráfico se puede apreciar de forma resumida la absorción de agua por capilaridad una vez calculados los resultados de los morteros utilizados. (Ver Figura 3.4)

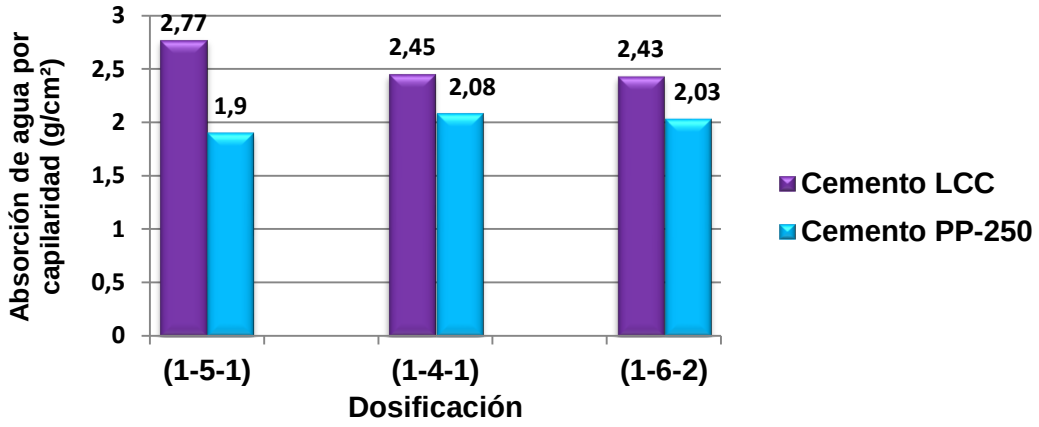


Figura 3.4 Comportamiento de la absorción del agua por capilaridad de los morteros.

El gráfico muestra como los morteros producidos con el Cemento de Bajo Carbono presentan significativamente más alta absorción que los morteros que utilizan PP-250, provocada por la alta porosidad, lo cual está influenciado por la elevada relación agua/cemento, debido al gran porciento de sustitución de adición activa y a la superficie específica que introduce a la mezcla. Otra posible causa, es la presencia de cierta cantidad de material inerte, la cual no reaccionó en la mezcla y produjo los poros. Un aumento de la cantidad de cemento puede ser una respuesta a este problema.

3.1.3 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la adherencia por tracción a las muestras de morteros

Para este ensayo se utilizó árido de la cantera conocida como Victoria de La Habana y como aglomerante Cemento de Bajo Carbono. Los ensayos fueron realizados en el CTDMC con un total de 21 muestras, 7 de cada dosificación como había sido explicado anteriormente. En la tabla 3.3 se pueden observar los resultados. (Ver tabla # 3.3)

Tabla 3.3 Resultados del ensayo de resistencia a la adherancia por tracción de las muestras de morteros a base de Cemento de Bajo Carbono.

	Resultados			
Dosificación (LCC)	Media (Mpa)	Máximo (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Especificaciones Adh. 28d. (MPa)
(1-5-1)	0,16	0,23	0,12	≥ 0,25
(1-4-1)	0,24	0,29	0,21	≥ 0,30
(1-6-2)	0,20	0,25	0,13	≥ 0,20

Como se puede apreciar los valores medios de la última dosificación cumple con lo establecido en la NC 791: 2010 “Código de buenas prácticas sobre la preparación, dosificación, mezclado y colocación de los morteros de albañilería”, mientras que los valores de las dos primeras no.

Comparando las dosificaciones (1-4-1) y (1-5-1), se puede decir que, a medida que aumenta la cantidad de áridos en la mezcla disminuye la resistencia a la adherencia por tracción; y de manera general los mayores resultados los obtienen las dosificaciones que presentan un 50% de relación aglomerantes (cemento + hidrato de cal) /áridos.

3.2 Análisis de los resultados de los ensayos a los bloques huecos de hormigón

3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de absorción a los bloques huecos de hormigón

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se les realizó a 3 bloques producidos con la dosificación antes mencionada en el capítulo anterior con el Cemento de Bajo Carbono para ver si con el mismo la fabricación a escala industrial de bloques huecos de hormigón cumple con lo establecido. Este ensayo se realizó a la edad de 28 días y se utilizó la siguiente expresión:

$$Ai = \frac{Mhi - Msi}{Msi} \times 100$$

- Ai absorción de la muestra (%)

- Mhi masa húmeda de cada unidad de la muestra (kg)
- Msi masa seca de cada unidad de la muestra (kg)

La siguiente tabla muestra los resultados. (Ver Tabla 3.3)

Tabla 3.3: Resultados del ensayo de absorción a los bloques huecos de hormigón.

Peso (g)		Absorción (%)
Ps	Ph	
10180	10360	1.7
9500	9780	2.8
10420	10740	3.0

Como se puede apreciar la muestra ensayada cumple con lo establecido en la NC 247: 2010 “Bloques huecos de hormigón — Especificaciones” la cual indica que para los bloques tipo II el porciento de absorción debe ser menor que 10.

3.2.2 Análisis de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los bloques huecos de hormigón

Se ensayaron 10 bloques huecos de hormigón de 10 cm de espesor y para los cálculos se utilizaron las siguientes expresiones:

$$R'i = \frac{aj}{Fj}$$

- R'i resistencia a la compresión de cada bloque (Mpa).
- Fj carga de rotura.
- aj área de la sección bruta del bloque.

$$SR' = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(R'i - R'm)^2}{n}}$$

- SR' valor de la desviación típica (Mpa).
- R’m resistencia a la compresión media (Mpa).
- R’i resistencia a la compresión de cada bloque (Mpa).
- n tamaño de la muestra de ensayo.

$$V = \frac{SR'}{R'm}$$

- V coeficiente de variación (%)
- SR' valor de la desviación típica (Mpa)
- R’m resistencia a la compresión media (Mpa)

En el siguiente gráfico se muestran los resultados. (Ver Figura 3.4

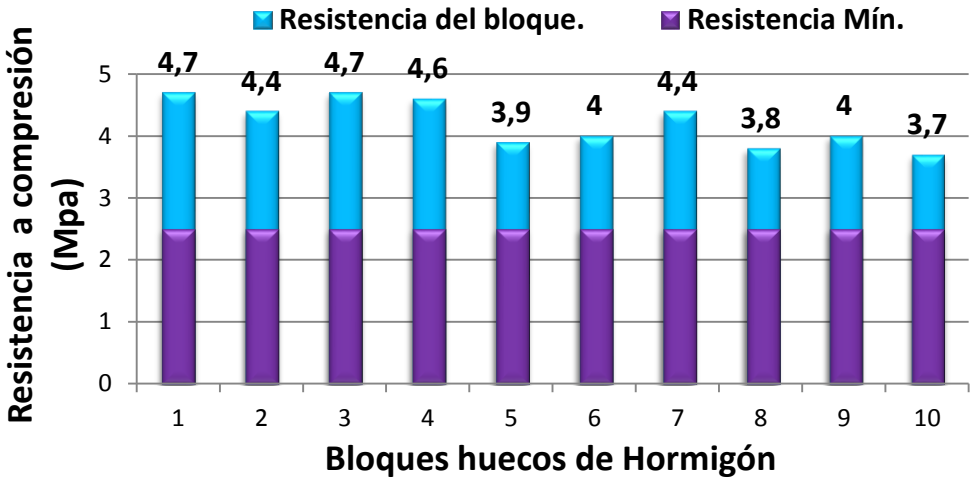


Figura 3.5 Comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón a la edad de 28.

Se puede ver en la Figura 3.5 como todos los bloques ensayados cumplen satisfactoriamente con la resistencia mínima establecida en la NC 247: 2010 "Bloques huecos de hormigón — Especificaciones" para este tipo de elemento, la cual especifica que para los bloques tipo II el valor mínimo de resistencia a la compresión a la edad de 28 días es de 2,5 Mpa.

3.3 Análisis de los resultados de los ensayos realizados a las tejas de microconcreto

3.3.1 Análisis de las dimensiones las tejas de microconcreto

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de dimensiones realizados a las tejas de microconcreto. (Ver tabla 3.4)

Tabla 3.4 Dimensiones de las tejas de microconcreto.

	Dimensiones (mm)				
No. Tejas	Extremo 1	Centro	Extremo 2	Promedio	Peso(kg)
1	6	6	8	6,67	2,325
2	6	5	7	6,00	2,45
3	7	6	7	6,67	2,36
4	7	7	7	7,67	2,55
5	6	7	8	7,67	2,5
6	7	5	5	5,67	2,44
7	6	5	6	5,67	2,47
8	8	7	8	7,67	2,55
9	8	6	8	7,33	2,49
10	8	6	5	6,33	2,39

Después de rotas las tejas en el ensayo de resistencia a flexión, se midió por tres lugares diferentes de la rotura con un pie de rey para saber su espesor. Se ensayaron un total de 24 tejas, de las cuales se eligieron solo 10 por estar en el intervalo esperado de 2,3 kg a 2,55 kg. Como se puede apreciar en la Tabla 3.4 las tejas producidas no cumplen con las dimensiones para las cuales fueron diseñadas, lo cual puede ser: una insuficiencia en la cantidad de mortero, una distribución no uniforme del mortero o que la mesa vibradora estuviera desnivelada.

3.3.2 Análisis de los resultados del ensayo de resistencia a flexión a las tejas de microconcreto

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a flexión realizado a las tejas de microconcreto a la edad de 28 días.

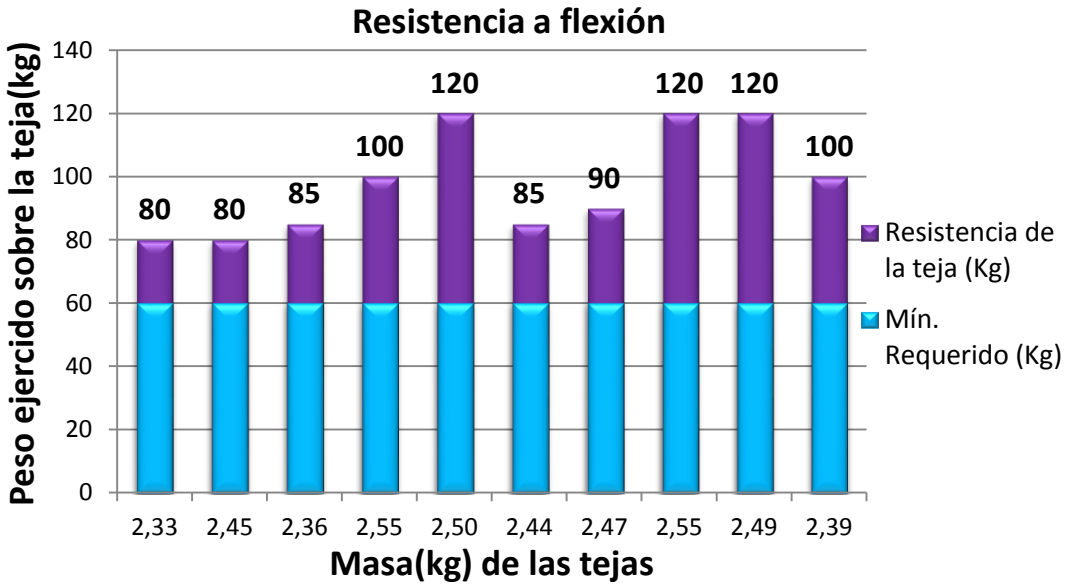


Figura 3.6 Comportamiento de la resistencia a flexión de las tejas de microconcreto

Como se aprecia en la figura 3.6 las tejas elaboradas con Cemento de Bajo Carbono cumplen satisfactoriamente con la resistencia a flexión requerida para su espesor, debiendo ser esta mayor de 60 kg para tejas de 8 mm de espesor. Constituyendo así una viable solución para techos.

3.3.3 Análisis de los resultados del ensayo de permeabilidad a las tejas de microconcreto

Para este ensayo se seleccionaron 3 tejas, en las cuales se formó un recipiente mediante la colocación de dos tapas de morteros que tomaron la forma de la sección para contener el agua; se les añadió el agua y se mantuvieron en un lugar húmedo.

Se observó después de las 24 horas para ver si aparecían gotas en la cara inferior de la misma o signos de humedad en algunas de las áreas y las tejas mostraron un excelente comportamiento en cuanto a la permeabilidad.

Figura 3.5 Ensayo de permeabilidad a las tejas de microconcreto

3.4 Conclusiones Parciales

- Los bloques huecos de hormigón fabricados con Cemento de Bajo Carbono presentan un excelente comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión y a la absorción cumpliendo con los parámetros normalizados para su tipo.
- Los morteros de albañilería producidos con Cemento de Bajo Carbono presentan una significativa baja resistencia a la flexión y compresión en comparación con los morteros que utilizan cemento PP-250, pero estos cumplen satisfactoriamente a la edad de 28 días con las resistencias establecidas por la NC 175: 2002 “Morteros de albañilería. Especificaciones”.
- La absorción capilar de los morteros producidos con Cemento de Bajo Carbono tienen un comportamiento menos apropiado para la dosificación empleada en su fabricación que aquellos donde se utilizó cemento PP-250.
- La resistencia a la adherencia por tracción requerida llega a ser obtenida por los morteros de albañilería a base de Cemento de Bajo Carbono que utilizaron la dosificación 1-6-2.
- Las tejas de microconcreto producidas con Cemento de Bajo Carbono cumplen con la resistencia a flexión esperada y muestran un excelente comportamiento a la permeabilidad.

Conclusiones Generales

- El cemento ternario obtenido mediante la sustitución de hasta un 45% del contenido de clínquer por la combinación arcilla calcinada-carbonato de calcio, conocido como Cemento de Bajo Carbono, utilizado en la elaboración de morteros y hormigones; muestra un lento fraguado y una baja resistencia inicial debido a su elevada relación agua/cemento provocada por el gran porciento de sustitución de adición activa y a la superficie específica que introduce a la mezcla.
- La utilización del Cemento de Bajo Carbono en la producción de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción, constituyendo así una viable alternativa para nuestro país.
- Los resultados obtenidos de la absorción de agua por capilaridad de los morteros de albañilería producidos con Cemento de Bajo Carbono presentan un comportamiento poco apropiado para la dosificación empleada, un aumento de la cantidad de este aglomerante pudiera ser una solución para este fenómeno.
- En los morteros de albañilería producidos con Cemento de Bajo Carbono los resultados de resistencia a compresión llegan a ser más bajos que los de cemento PP-250, pero estos cumplen satisfactoriamente con la resistencia requerida para el tipo seleccionado.
- Los resultados requeridos de resistencia a la adherencia por tracción en morteros de albañilería a base de Cemento de Bajo Carbono se obtuvieron solamente en los morteros tipo I, aunque estos no fueron los que presentaron mayores resultados.
- Las tejas de microconcreto producidas con Cemento de Bajo Carbono, aunque no presentaron las dimensiones deseadas, cumplieron con la resistencia a flexión esperada y mostraron un excelente comportamiento a la permeabilidad; constituyendo así una factible solución para nuestros techos.

Recomendaciones

- Realizar estudios de las propiedades reológicas de los morteros de albañilería a base de Cemento de Bajo Carbono donde se incluyan la retención de agua y la durabilidad.
- Realizar ensayos de resistencia a compresión a otras edades para observar la variación de la misma.
- Obtener un diseño de mezclas más adecuado para el uso de este nuevo aglomerante, tanto para bloques huecos de hormigón como para morteros.
- Evaluar el efecto de diferentes cantidades y tipo de aditivos en hormigones fabricados con este aglomerante.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGARWAL, S. K. 2006. Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research,* 36**,** 1735–1739.
2. ALUJAS, A., FERNÁNDEZ,R., MARTIRENA,F.J., QUINTANA, R. 2010. Empleo de arcillas caoliníticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland. *Revista CENIC,* 41**,** 1-10.
3. ANTONI, M. 2013. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone. *ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE,* 6001**,** 254.
4. BETANCOURT, R. S. 2013. Cementos puzolánicos. *Documentos en la red de la Facultad de Construcciones***,** 11.
5. BETANCOURT, R. S. 2013. Composición mineral del cemento Pórtland. Documentos en la red de la Facultad de Construcciones, 10.
6. BONAVETTI, V. L., MENÉNDEZ, G., DONZA, A.H., RAHHAL, F.V., IRASSAR, F.E. 2006. Composite cements containing natural pozzolan and granulated blast furnace slag. Materiales de Construcción, 56, 283.
7. CABRERA, F. P. 2013. Cuba, pionera en la producción de cemento ecológico. Granma, 86.
8. CABRERA, J. L. Á. 2011. Morteros de Albañilerías. Antecedentes, clasificación,materiales,métodos de ensayo y tabla de resultados. Editorial Obras, 76.
9. CECAT, I. S. P. J. A. E. Tecnología de cubiertas ligeras. TEVI. Manual de uso.
10. DIAMOND, S., HUANG, J. 2001. The ITZ in concrete-a different view based on image analysis and SEM observations. *Cement and Concrete Composites,* 23.
11. DÍAZ, A. A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente* Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.
12. HELLER-KALLAI, L. 2006. Hanbook of clay science. *Elsevier Ltd.,* 1**,** 1210.
13. HERNÁNDEZ, J. F. M. 2013. Project Documentation Low Carbon Cement (LCC). Phase 1 (2014-2017).
14. LARA, C. R., ANTONI, M., ALUJAS, A., SCRIVENER, K., HERNÁNDEZ,M.F.J. 2011. Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. *Revista Ingeniería de Construcción* 26.

15. LARA, R. C. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza.* Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.
16. LAWRENCE, P., ET AL. 2005. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research,* 35**,** 1092– 110.
17. 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.PhD, Universidad Central de Las Villas.
18. MARTIRENA , J. F. 2010. El Metakaolin. Producción y Usos. Potencial para Cuba.
19. MARTIRENA, J. F. 2011. El Metakaolin. Investigaciones Realizadas en Cuba.
20. MASSAZZA, F. 1993. Pozzolanic Cements,. *Cement and Concrete Composites,* 15**,** 185-214.
21. MEGAT, J., M.A., 2011. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*.
22. MENÉNDEZ, G., BONAVETTI, L.V., IRASSAR, F.E. 2006. Ternary blended cement concrete. Part I: early age properties and mechanical strength. *Materiales de Construcción,* 56**,** 284, 55-67
23. MULLER, C. J. 2005. Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics. *SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH***,** 159.
24. MURRAY, H. H. 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Scienc* 17**,** 5-6.
25. NIELSEN, K. A. 1991. "Thermal analysis in the research and development of advanced technical ceramics.". Thermochimica Acta, 175(1), 13-24.
26. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2001. NC 95: 2001 Cemento Pórtland. Especificaciones. Ciudad de La Habana, Cuba.
27. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2001. NC 96: 2001 Cemento con adición activa. Especificaciones. Ciudad de La Habana, Cuba.
28. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2002. NC 170: 2002 Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas. Ciudad de La Habana, Cuba.

29. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2002. NC 171: 2002 Mortero endurecido. Determinación dela absorción de agua por capilaridad. Ciudad de La Habana, Cuba.
30. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2002. NC 172: 2002 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción. Ciudad de La Habana, Cuba.
31. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2002. NC 173: 2002 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión. Ciudad de La Habana, Cuba.
32. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2002. NC 175: 2002 Morteros de Albañilería. Especificaciones.. Ciudad de La Habana, Cuba.
33. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2004. NC 353: 2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros—especificaciones. Ciudad de La Habana, Cuba.
34. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2005. NC 250-2005 Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural. Ciudad de La Habana,Cuba.
35. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2005. NC 251: 2005 Áridos para hormigones hidráulicos—Requisitos. Ciudad de La Habana,Cuba.
36. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2008. NC 657: 2008 Áridos para morteros de albañilería — Especificaciones. Ciudad de La Habana, Cuba.
37. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2010. NC 247: 2010 Bloques huecos de hormigón — Especificaciones. Ciudad de La Habana, Cuba.
38. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2010. NC 791: 2010 Códigos de buenas prácticas sobre la preparación, dosificación, mezclado y colocación de los morteros de albañilerías. Ciudad de La Habana, Cuba.
39. PAPADAKIS, V. G. 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research,* 32**,** 1525–1532.
40. PHAIR, J. W. 2006. Green chemistry for sustainable cement production and use *The Royal Society of Chemistry,* 8**,** 763–780.
41. RESTREPO, J. 2006. Efectos de la adición de Metacaolín en el Cemento Pórtland. *Revista Dyna,* 73**,** 131-141.
42. RODRIGO, F. L. 2009. Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries. *ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE,* 4309**,** 178.

43. SABIR, B. B., W, S., BAI, J. 2001. Metakaolin and calcinated clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites,* 23**,** 441-454.
44. SAKAI, E., ET AL. 2005. Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research* 35**,** 1135– 1140
45. SALAZAR, A. 1992. Morteros de mampostería. Efecto de las adiciones de caliza y cal en sus propiedades. *ASOCRETO,Bogotá.*
46. TAYLOR, H. F. W. 1990. Cement Chemistry. London.
47. TODOR, D. N. 1976. Thermal Analysis of Minerals. *Kent: Abacuss Press***,** 256.
48. TORREDEMERT, O. E. 1995. Guía de consulta TMC. *Centro de Estudio de Construcción y Arquitectura Tropical. CECAT CUJAE.* La Habana, Cuba.

Anexos

Anexo 1. Resultados del análisis estadístico de la resistencia a compresión de probetas prismáticas de morteros a la edad de 28 días mediante el Statgraphics.

LCC	Serie 1					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	4,63	5,00	5,00	4,75	5,13	4,88
(1-4-1)	7,00	6,75	7,00	6,63	7,50	6,75
(1-6-2)	3,625	3,625	3,75	3,5	3,25	3,625

LCC	Serie 2					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	4,63	4,88	5,00	4,88	4,88	4,50
(1-4-1)	7,13	6,50	6,38	6,75	7,00	7,00
(1-6-2)	3,75	3,625	3,875	3,5	3,5	3,75

LCC	Serie 3					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	---	---	---	---	---	---
(1-4-1)	7,25	6,88	7,50	7,00	6,88	7,00
(1-6-2)	3,75	3,625	---	---	---	---

PP-250	Serie 1					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	8,50	7,63	7,75	8,38	8,25	8,25
(1-4-1)	8,38	9,63	9,13	9,50	9,75	10,63
(1-6-2)	5,50	4,50	5,13	5,13	5,25	5,13

PP-250	Serie 2					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	7,63	7,63	7,63	8,88	8,75	8,75
(1-4-1)	9,13	9,50	9,25	8,63	8,88	8,50
(1-6-2)	4,63	5,00	5,25	5,13	5,63	5,63

PP-250	Serie 3					
	1	2	3	4	5	6
(1-5-1)	8,38	7,88	8,38	7,88	7,88	7,75
(1-4-1)	8,50	10,75	9,38	9,25	10,13	10,50
(1-6-2)	5,75	5,63	5,75	6,00	5,75	5,88

ANOVA Multifactorial – f´c Mpa 28 días

Variable dependiente: f´c Mpa

Factores:

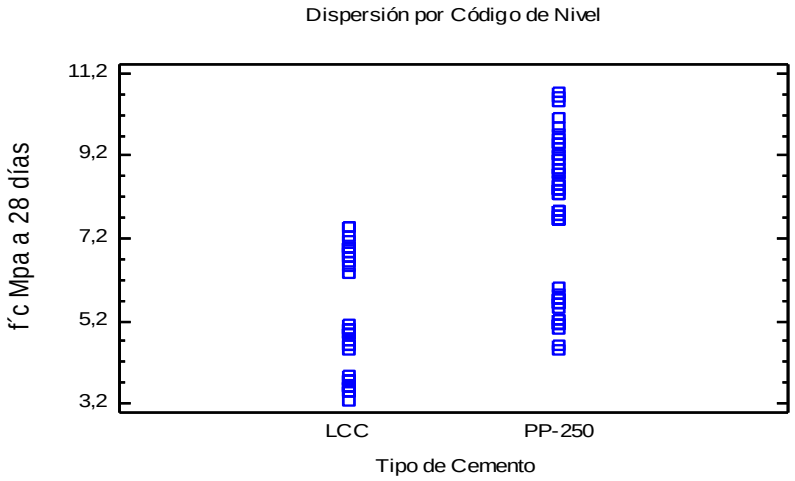
Tipo de Cemento

Número de casos completos: 98

Análisis de Varianza para f´c Mpa 28 días - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-P*
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Tipo de Cemento	133,313	1	133,313	48,28	0,0000
RESIDUOS	265,053	96	2,76097		
TOTAL (CORREGIDO)	398,365	97			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual



Puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre f´c Mpa a 28 días con un 95,0% de nivel de confianza.

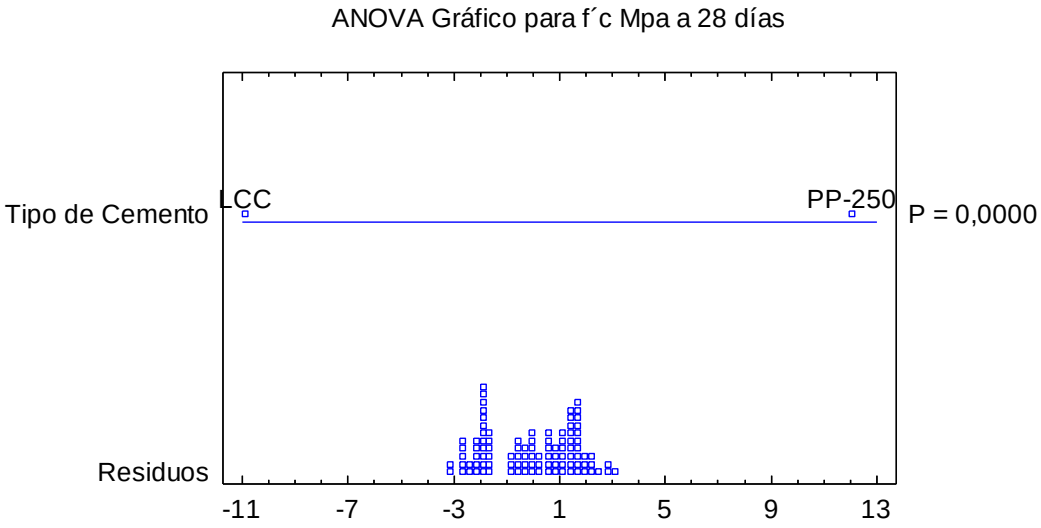
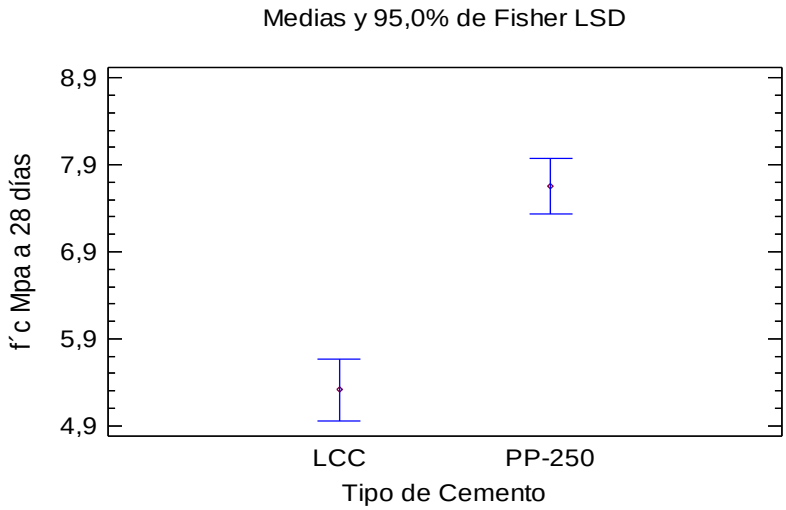


Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para f´c Mpa a 28 días con intervalos de confianza del 95,0%

			Error	*Límite*	*Límite*
Nivel	*Casos*	*Media*	*Est.*	*Inferior*	*Superior*
MEDIA GLOBAL	98	6,48495			
Tipo de Cemento					
LCC	44	5,3125	0,250498	4,81526	5,80974
PP-250	54	7,65741	0,226117	7,20857	8,10625

Esta tabla muestra la media de f´c Mpa a 28 días para cada uno de los niveles de los factores. También muestra los errores estándar de cada media, los cuales son una medida de la variabilidad en su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias.



Pruebas de Múltiple Rangos para f´c Mpa a 28 días por Tipo de Cemento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tipo de Cemento	*Casos*	*Media LS*	*Sigma LS*	*Grupos Homogéneos*
LCC	44	5,3125	0,250498	X
PP-250	54	7,65741	0,226117	X

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
LCC - PP-250	*	-2,34491	0,669851

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Anexo 2. Resultados del análisis estadístico de la absorción de agua por capilaridad en probetas prismáticas de morteros a la edad de 28 días mediante el Statgraphics.

LCC	Absorción (g/cm²)		
(1-5-1)	2,80	2,94	2,59
(1-4-1)	2,09	2,63	2,64
(1-6-2)	2,07	2,44	2,79

PP-250	Absorción (g/cm²)		
(1-5-1)	2,03	1,83	1,84
(1-4-1)	2,39	2,27	1,59
(1-6-2)	2,15	2,03	1,91

ANOVA Multifactorial - Absorción

Variable dependiente: Absorción (g/cm²)

Factores:

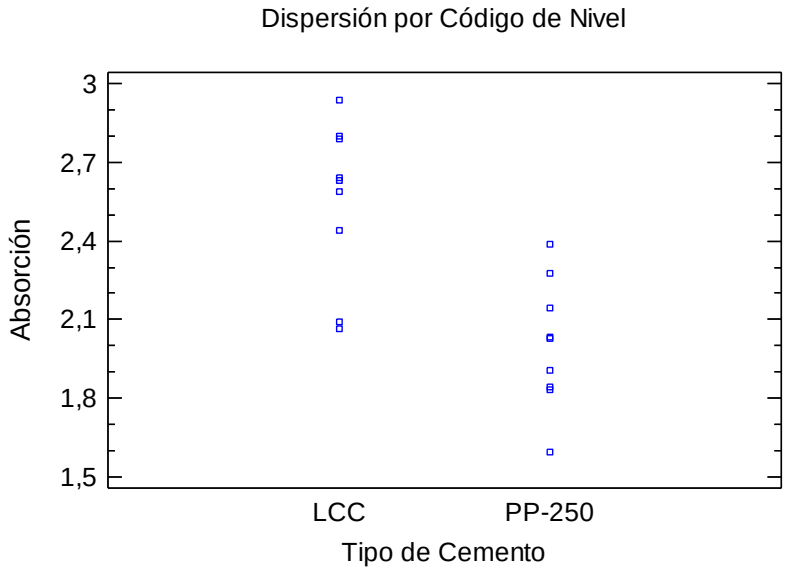
Tipo de Cemento

Número de casos completos: 18

Análisis de Varianza para Absorción - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	*Suma de Cuadrados*	*Gl*	*Cuadrado Medio*	*Razón-F*	*Valor-P*
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Tipo de Cemento	1,36091	1	1,36091	17,88	0,0006
RESIDUOS	1,21803	16	0,0761268		
TOTAL (CORREGIDO)	2,57893	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

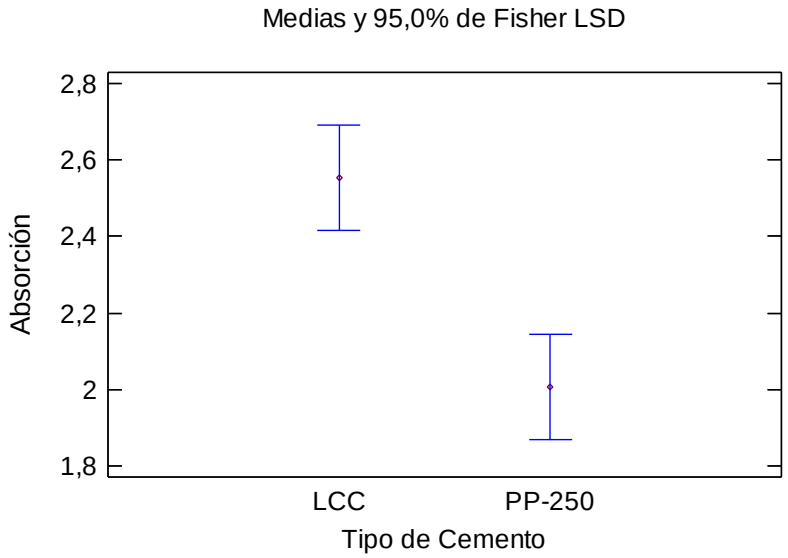


Puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Absorción con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Absorción con intervalos de confianza del 95,0%

			Error	Límite	Límite
Nivel	Casos	Media	Est.	Inferior	Superior
MEDIA GLOBAL	18	2,27927			
Tipo de Cemento					
LCC	9	2,55424	0,0919703	2,35927	2,7492
PP-250	9	2,00431	0,0919703	1,80934	2,19927

Esta tabla muestra la media de Absorción para cada uno de los niveles de los factores. También muestra los errores estándar de cada media, los cuales son una medida de la variabilidad en su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias. Pueden desplegarse estas medias e intervalos seleccionado Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas.



Pruebas de Múltiple Rangos para Absorción por Tipo de Cemento

Tipo de Cemento	*Casos*	*Media LS*	*Sigma LS*	*Grupos Homogéneos*
PP-250	9	2,00431	0,0919703	X
LCC	9	2,55424	0,0919703	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

Contraste	*Sig.*	*Diferencia*	*+/- Límites*
LCC - PP-250	*	0,549931	0,275727

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.