

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

TRABAJO DE DIPLOMA



Título: Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa.

**Diplomante: Yairan Aguilar Contreras.
Tutores: Msc. Ing. Pedro Seijo Pérez.
Dr. Ing. Iván Machado López.**

**Santa Clara
2015**

PENSAMIENTO

**La ciencia no solo es compatible con la espiritualidad;
es una fuente profunda de espiritualidad.**

Carl Sagan

DEDICATORIA

**A mi madre, porque ella lo es todo para mí.
A toda mi familia por su ayuda y comprensión
a lo largo de estos años.
A mi tío Ignacio y a mi abuela Eduarda,
porque aunque no están presentes físicamente,
siempre estarán en mi corazón.**

AGRADECIMIENTO

A mi madre por su esfuerzo y dedicación.

**A mi familia por haberme apoyado durante toda mi
vida de estudiante.**

**A mis compañeros inseparables de aula Dairon y Dayan
por su ayuda incondicional.**

A mi novia y su familia por su ternura y apoyo.

A mis tutores Pedro Seijo e Iván Machado.

**A los trabajadores del Taller de Mantenimiento Constructivo
en Manicaragua.**

Al equipo de trabajo de la ENIA, en especial a Yander y Solís.

**A todos los profesores que durante estos cinco años han
contribuido a mi educación y formación profesional.**

**A todos,
¡Gracias!**

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el uso de la adición combinada de caliza con arcilla calcinada obtenida a partir de la molturación de piezas de cerámica roja, en la producción a escala local de cementos de bajo carbono LC3, para su posterior utilización en la fabricación de bloques huecos de hormigón de 10cm de ancho y un hormigón de hasta 20 MPa. Los aglomerantes fabricados presentan una sustitución del 50% del cemento P-35 por un 30% de polvo de ladrillo o rasilla de barro calcinada y un 20% de caliza. La fabricación de los cementos se realizó en dos talleres artesanales, donde se usaron equipos de molienda y técnicas de mezclado diferentes. A los cementos LC3 artesanales se les realizó el ensayo de finura mediante el método del tamizado, el ensayo del minicono para evaluar la laborabilidad de las pastas de cemento y los ensayos de campo especificados en el “Manual de Calidad del cemento de bajo carbono LC3” para evaluar la finura, el fraguado y el carácter hidráulico de los mismos. Las características de los áridos empleados para la fabricación de los cementos y sus aplicaciones, fueron obtenidas a partir de ensayos realizados en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santa Clara, donde también fueron realizados el ensayo de resistencia a la compresión del hormigón y los ensayos de dimensiones, resistencia y absorción a los bloques fabricados en el taller de Mantenimiento Constructivo, en el municipio de Manicaragua.

ÍNDICE

PENSAMIENTO..... I

DEDICATORIA II

AGRADECIMIENTOIII

RESUMEN..... IV

ÍNDICE VI

INTRODUCCIÓN..... 1

Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos ternarios para su aplicación en la producción de bloques huecos de hormigón..... 6

1.1 Materiales Aglomerantes..... 6

1.1.1 Cemento Portland. Generalidades..... 7

1.1.2 Tipos de cemento Portland..... 9

1.1.3 Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente en la producción de cemento.11

1.1.4 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).....13

1.1.5 Reacciones puzolánicas.....16

1.1.6 Cemento de Bajo Carbono LC3 Industrial18

1.1.7 Producción local de cemento LC3 a pequeña escala20

1.2 Talleres de producción de prefabricado de pequeño formato.....21

1.2.1 Producción de bloques huecos de hormigón22

1.2.2 Bloques huecos de hormigón. Características.....24

1.2.3 Clasificación de los bloques huecos de hormigón según la Norma Cubana.24

1.2.4 Máquina utilizada para la producción a pequeña escala de bloques huecos de hormigón. Características.....26

1.3 Conclusiones parciales27

Capítulo II: Características de los materiales y descripción de los procesos de producción del cemento LC3 artesanal y de los bloques huecos de hormigón.29

2.1	Generalidades	29
2.2	Diseño del experimento	29
2.3	Características de las materias primas utilizadas para la fabricación de los cementos LC3 artesanales.....	30
2.3.1	Cemento P-35	30
2.3.2	Gravilla	31
2.3.3	Polvo de piedra	32
2.3.4	Arcilla calcinada artificialmente obtenida a partir de residuos de la quema de ladrillos y rasillas de cerámica roja.....	33
2.4	Proceso de fabricación de los aglomerantes a pequeña escala.	33
2.4.1	Fabricación del cemento LC3 de Santa Clara.....	34
2.4.2	Fabricación del cemento LC3 de Manicaragua.....	35
2.5	Descripción de los ensayos realizados a los cementos.....	35
2.5.1	Ensayo de Finura	36
2.5.2	Ensayo de Sedimentación.....	36
2.5.3	Ensayo Visual- Táctil.....	37
2.5.4	Ensayo de la Huella.....	37
2.5.5	Hidraulicidad.....	38
2.5.6	Ensayo del Minicono	39
2.6	Características de las materias primas utilizadas para la fabricación de los bloques huecos de hormigón	40
2.6.1	Árido fino.....	40
2.6.2	Árido grueso.....	41
2.6.3	Agua.....	42
2.7	Proceso de fabricación de los bloques huecos de hormigón.....	42
2.8	Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón.....	44
2.8.1	Ensayo de dimensiones	45

2.8.2 Ensayo de resistencia a compresión	46
2.8.3 Ensayo de absorción	46
2.9 Fabricación de las probetas de hormigón de 20 MPa	47
2.10 Conclusiones parciales	49
Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros físicos-mecánicos de los cementos LC3 artesanales y sus aplicaciones.....	50
3.1 Generalidades	50
3.2 Análisis de los resultados de los aglomerantes.....	50
3.2.1 Ensayo de Finura	50
3.2.2 Ensayos de Sedimentación	51
3.2.3 Ensayo Visual- Táctil.....	52
3.2.4 Ensayo de la Huella.....	52
3.2.5 Ensayo de Hidraulicidad.....	53
3.2.6 Ensayo del Minicono	53
3.3 Análisis de los resultados de los bloques huecos de hormigón.....	54
3.3.1 Ensayo de dimensiones	54
3.3.2 Ensayo de resistencia a compresión a los bloques huecos de hormigón.....	55
3.3.3 Ensayo de absorción a los bloques huecos de hormigón	58
3.4 Análisis de los resultados del ensayo de compresión al hormigón de 20 MPa	59
3.5 Conclusiones parciales	61
CONCLUSIONES GENERALES	62
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS.....	70
Anexo 1: Resultado del ensayo de la huella para los cementos LC3 artesanales y el cemento P-35.....	70
Anexo 2: Resultados del ensayo de dimensiones de los bloques	70

Anexo 3: Molinos utilizados para la fabricación de los cementos LC3 artesanales74

Anexo 4: Resultados del ensayo de resistencia a compresión de los cementos LC3 artesanales a los tres días74

INTRODUCCIÓN

El Cemento Portland es uno de los materiales más empleados a nivel mundial, es uno de los principales contribuidores del desarrollo de la humanidad y es considerado como el material más usado en la industria de la construcción. Inevitablemente en los procesos de fabricación del cemento grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) son liberadas a la atmósfera, se dice que la industria del cemento constituye una de las más contaminantes al medio ambiente ya que es responsable de entre el 5 y el 8 % de las emisiones globales de CO_2 (WBCD -CSI, 2012).

Con el incremento de la demanda y de la producción de cemento en años venideros, estas emisiones tenderán a crecer significativamente (Cembureau, 2011). La industria del cemento demanda grandes cantidades de energía, en la combustión de las materias primas en el horno, así como la molienda para reducir hasta polvo el clínquer y es por esto que consume alrededor del 6 % del consumo de energía en el sector industrial (Agency, 2013).

Debido a estos factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas estrategias se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínquer. Siendo esta última la opción más viable para la industria cubana, pues requiere de menores inversiones a corto plazo.

La cantidad de clínquer que puede ser sustituido por materiales cementicios suplementarios (MCS) depende del tipo de MCS empleado. Los MCS tradicionalmente utilizados son desechos de procesos industriales, como las cenizas volantes, la microsílíce y las escorias de alto horno, además de puzolanas naturales como tobas zeolitizadas y cenizas volcánicas. Otro material ampliamente usado por la industria del cemento es el carbonato de calcio en forma de piedra caliza sin calcinar, que se añade habitualmente en bajas proporciones como material inerte (Vizcaíno , 2014).

Es de gran importancia potenciar el desarrollo de investigaciones destinadas a desarrollar nuevas fuentes de materiales puzolánicos, que permitan la producción de aglomerantes en cantidades suficientes y a un costo asequible desde el punto de vista económico, energético y medioambiental. Especial atención debe prestarse al empleo de fuentes de materiales

locales que se encuentren disponibles, en particular aquellas que permitan su utilización como fuente de materiales puzolánicos (Alujas, 2010).

Esta concepción ha sido parte esencial del trabajo que durante varios años ha desarrollado el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas donde se han obtenido interesantes resultados en los últimos años ya que se ha desarrollado un producto consistente en un tipo de cemento mezclado a partir de la combinación de clínquer, caliza y arcilla calcinada (cemento de bajo carbono). El cemento de bajo carbono (LC3) es un tipo de cemento ternario producido industrialmente en la planta de cemento Siguaney en Santi Spiritus y los resultados experimentales han ofrecido ventajas y bondades de tipo económico y ecológico a la innovación científica, contando en la actualidad con aplicaciones prácticas en Cuba (Vizcaíno , 2014).

Otra alternativa para la obtención de LC3 además de la producción industrial es de manera artesanal, en talleres que tengas las condiciones creadas para la fabricación de cemento de bajo carbono donde se sustituye el 50% del cemento P-35 por un 30% de arcilla calcinada obtenida a partir de la trituración de piezas de cerámicas roja (ladrillos, tejas, tubos, rasillas) y un 20% de piedra caliza sin calcinar. Con estas producciones de cemento a pequeña escala se reduce aún más el consumo de energía, se aprovechan las fuentes locales de materias primas, fundamentalmente los desechos de la producción de cerámica roja y se contribuye considerablemente al desarrollo local al poder obtener un producto que se pueda comercializar y con las características apropiadas para la elaboración de piezas prefabricadas de pequeño formato, de forma descentralizada.

Lo planteado anteriormente da lugar a nuestra **Situación Problémica** que se identifica como la necesidad de producir un cemento de bajo carbono de forma artesanal, que pueda ser utilizado para la fabricación de bloques huecos de hormigón y hormigón masivo de 20 MPa.

En la presente investigación se plantea como **Problema científico**:

¿En qué medida la fabricación de cementos de bajo carbono a pequeña escala a partir de cemento P-35 con adiciones de polvos de cerámica roja y caliza, logran propiedades físicas y mecánicas que permitan su empleo en la producción de bloques huecos de hormigón y de un hormigón de hasta 20 MPa?

Teniendo en cuenta el proceso de fabricación artesanal de los materiales cementantes producidos para obtener hormigones de características similares a los producidos con cemento Portland se formula la siguiente **Hipótesis**: La obtención de cementos de bajo carbono en talleres artesanales de Villa Clara, permite sustituciones de hasta un 50% del cemento Portland por arcillas calcinadas molturadas de productos de cerámica roja y carbonato de calcio, sin afectar las propiedades físico-mecánicas de bloques huecos de hormigón y de un hormigón de 20 MPa.

El **Objetivo General** de esta investigación es:

Producir un cemento LC3 de forma artesanal con propiedades físico-mecánicas similares a la de los cementos Portland con adición activa bajo la especificación de la NC 96-2011, para la fabricación de bloques huecos y hormigones de hasta 20 MPa.

Objetivos Específicos:

1. Fundamentar los constituyentes, procesos y aplicaciones de los cementos mezclados en condiciones variadas de fabricación.
2. Elaborar dos tipos de cementos LC3 en condiciones de pequeña escala variando los constituyentes cerámicos y calizos y el protocolo de molienda.
3. Fabricar bloques huecos de hormigón y un hormigón de 20 MPa elaborados con los cementos LC3 obtenidos de forma artesanal.
4. Analizar los resultados obtenidos en las propiedades de los cementos LC3 producidos en talleres así como de los bloques y hormigones fabricados con ellos.

Para dar cumplimiento a los objetivos anteriormente mencionados se proponen como

Tareas científicas:

1. Revisión de la literatura científica sobre el proceso de fabricación de aglomerantes y características de las materias primas así como la revisión de las normas para la producción de bloques huecos de hormigón.
2. Caracterización de las materias primas para la producción artesanal de los cementos LC3.
3. Producir los cementos LC3 de forma local.

4. Realizar los ensayos de campo especificados en el “Manual de Calidad del cemento de bajo carbono LC3” a los cementos fabricados.
5. Caracterización de las materias primas para la producción de los bloques huecos de hormigón.
6. Producir los bloques huecos de hormigón fabricados con cemento LC3 obtenido artesanalmente.
7. Realizar los ensayos físico-mecánicos establecidos en la NC 247-2010 para bloques huecos de hormigón.
8. Producir un hormigón masivo de 20 MPa.
9. Realizar el ensayo de resistencia a compresión establecidos en las NC 724-2011 para hormigones endurecidos.

Novedad Científica

Se demuestra que un cemento LC3 producido artesanalmente mantiene las propiedades físico-mecánicas exigidas según la normativa vigente para cementos con adición y pueden ser utilizados para fabricar bloques huecos de hormigón y un hormigón masivo de hasta 20 MPa.

Estructura de la tesis:

Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos ternarios para su aplicación en la producción de bloques huecos de hormigón.

Se presenta una revisión bibliográfica sobre el cemento Portland y la necesidad de la implementación de cementos ternarios con altos niveles de sustitución de clínquer con el uso de materiales cementicios suplementarios. Además se hace referencia a la producción de bloques de hormigón, sus características y clasificación según la norma cubana.

Capítulo II: Características de los materiales y descripción de los procesos de producción del cemento LC3 artesanal y de los bloques huecos de hormigón.

Se presenta el diseño de la investigación. Se exponen las características de los materiales que se utilizaron para la fabricación a pequeña escala del cemento LC3 y de los bloques huecos de hormigón. Se describen los procesos de obtención y los ensayos realizados a los cementos LC3, a los bloques huecos de hormigón y al hormigón masivo de 20 MPa.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros físico-mecánicos de los cementos LC3 artesanales y sus aplicaciones.

Se expone el análisis de los resultados arrojados por los ensayos realizados con anterioridad en el capítulo II. Posteriormente se brindan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos ternarios para su aplicación en la producción de bloques huecos de hormigón

1.1 Materiales Aglomerantes

Los aglomerantes son materiales que en estado pastoso y con consistencia variable tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, son capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos físicos hasta alcanzar resistencias mecánicas considerables (Anónimo, 2015).

De forma general existen diferentes tipos de aglomerantes como son los aglomerantes naturales que proceden de una roca natural sin adición alguna, como el yeso, la cal y los cementos naturales y los aglomerantes artificiales que se obtienen de la calcinación de mezclas de piedras de composición conocida y cuidadosamente dosificadas. Como es el caso de los cementos artificiales. Hay que hacer otra distinción entre aglomerantes aéreos y aglomerantes hidráulicos, los aéreos son los que solo fraguan y se endurecen en contacto con el aire y no contienen arcilla y los hidráulicos son aquellos que fraguan lo mismo en el aire que en agua y contienen arcilla en cantidades relativamente importantes. Entre los aglomerantes más usados están los primarios como son el yeso, la cal y el cemento y los secundarios que mezclados con los áridos, arenas y gravas, forman los componentes más utilizados, los morteros y el hormigón. Las características de cada uno de estos aglomerantes se muestran a continuación (Anónimo, 2015).

Yeso: Es un producto preparado a partir de piedras naturales como el aljez u otras, mediante deshidratación, es uno de los más antiguos materiales empleados en construcción. En el período Neolítico, con el dominio del fuego, comenzó a elaborarse yeso calcinando aljez. Se utiliza en la construcción para la producción de cemento y en forma de pasta para guarnecidos, enlucidos y revoques; como pasta de agarre y de juntas.

Cal: Este material se obtiene de las rocas calizas calcinadas a una temperatura entre 900 °C y 1200 °C, durante días, en un horno rotatorio o en un horno tradicional, romano o árabe. La cal se ha usado desde la antigüedad, en la construcción y para pintar muros y fachadas de edificios.

Cemento: Es un aglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas, que posteriormente molidas tiene la propiedad de endurecer al estar en contacto con el agua.

Mortero: Es una combinación de aglomerantes y aglomerados. Los más comunes son los morteros de cemento y están compuestos por cemento, agregado fino y agua. Generalmente, se utilizan para obras de albañilería, como material de agarre y revestimiento de paredes. Se nombran según el tipo de aglomerante que los componen: morteros de cal, morteros de cemento Portland, morteros de cemento de aluminato de calcio y morteros bastardos.

Hormigón: Es el material resultante de la mezcla de cemento con agregados pétreos (grava y arena) y agua. El cemento, mezclado con agua, se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas fragua y se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo. La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado al acero recibiendo el nombre de hormigón armado, comportándose el conjunto muy favorablemente ante las diversas sollicitaciones.

1.1.1 Cemento Portland. Generalidades

El cemento "Portland" tiene sus orígenes en la cal u óxido de calcio, a partir del cual y luego de cientos de años de estudios empíricos y científicos, se llega a lo que hoy se conoce como cemento. En 1824, un albañil Inglés llamado Joseph Aspdin, patentó un producto que él llamó cemento Portland, pues al endurecerse adquiría un color semejante al de una piedra de la isla Portland en Inglaterra. En 1838, este cemento se utilizó por primera vez en una construcción de importancia, en uno de los túneles construidos bajo el río Támesis en Londres. Un técnico norteamericano llamado David Saylor, fue el primero en fabricar cemento en América, dando lugar en 1850 al nacimiento de la industria cementera en Norteamérica. El uso del cemento Portland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo (Artega , 2009).

Su uso prácticamente en todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de lograr una producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos

en sus aplicaciones han sido la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecederon, los cuales han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería (Martirena, 2003).

En el 2012 la producción global de cemento alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3 % en comparación al año anterior (Cembureau, 2012). El incremento de la demanda de los últimos años tiene su fundamento en el desarrollo y crecimiento de las llamadas “economías emergentes” que necesitan construir la infraestructura de base para la industrialización y urbanización en sus países. Solamente en 2010, países de Suramérica, África y Asia generaron el 85 % de la producción anual de cemento (Cembureau, 2011).

El Cemento Portland es un conglomerante hidráulico, obtenido por la pulverización del clínquer con la adición de piedra de yeso natural, en un porcentaje no superior al 5%, para retrasar el fraguado. El clínquer está compuesto normalmente por cuatro fases principales: alita, belita, aluminato, ferrita y algunas otras como ciertos sulfatos de álcalis y óxido de calcio que están presentes en menores proporciones. Su color es gris, más o menos oscuro, según la cantidad de óxido férrico. Cuando es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica (Rossen, 2010)(Castillo, 2010).

La Composición Química y mineralógica del Cemento Portland puede variar dentro de cierto rango sin que el cemento pierda su condición de Portland, sus componentes simples expresados en forma de óxidos son los siguientes.

Óxido de calcio..... (60---67%).

Óxido de silicio..... (17---25%).

Óxido de aluminio..... (2---9%).

Óxido de hierro..... (0.5---6%).

Óxido de manganeso..... (0---5%).

1.1.2 Tipos de cemento Portland

De acuerdo a la norma C -150 de la ASTM existen diferentes tipos de cemento Portland, los cuales están clasificados en:

Tipo I: Cemento de uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias.

Tipo II: Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede ocasionar agrietamientos, así como donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos.

Tipo III: Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es utilizado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días, así como cuando se necesita remover encofrados lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente.

Tipo IV: Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo (hormigón), donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento, deba ser minimizada.

Tipo V: Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas.

La norma ASTM C-595 describe 5 clases de cementos mezclados, de estos se pueden encontrar diferentes combinaciones, a las cuales se les agrega un sufijo de acuerdo a las propiedades que pueden alcanzar: “MS” de moderada resistencia a los sulfatos, “A” con inclusores de aire y “MH” de moderado calor de hidratación.

a. Cemento Portland de Escoria de Altos Hornos.

i. Tipo IS, de uso general en construcciones de concreto.

1. Tipo IS (MS).

2. Tipo IS (A).

3. Tipo IS (MH).

b. Cemento Portland puzolánico.

i. Tipo IP De uso general en construcciones de concreto.

1. Tipo IP (MS).
2. Tipo IP (A).
3. Tipo IP (MH).
- ii. Tipo P de alta resistencia inicial.
 1. Tipo P (MS).
 2. Tipo P (A).
 3. Tipo P (LH).
- c. Cemento de Escoria,
 - i. Tipo S. Para morteros de levantado.
 1. Tipo S (A).
- d. Cemento Portland modificado con puzolana
 - i. Tipo I (PM). De uso general en construcciones de concreto.
 1. Tipo I (PM) (MS).
 2. Tipo I (PM) (A).
 3. Tipo I (PM) (MH).
- e. Cemento Portland Modificado con Escoria.
 - i. Tipo I (SM). De uso general en construcciones de concreto.
 1. Tipo I (SM) (MS).
 2. Tipo I (SM) (A).
 3. Tipo I (SM) (MH).

En nuestro país los diferentes tipos de cemento se clasifican según las NC 95:2011 (Cemento Portland-Especificaciones), y la NC 96:2011 (Cemento con adición activa-Especificaciones) las que plantean:

NC 95:2011 (Cemento Portland-Especificaciones)

El producto se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en (MPa).

Cemento Portland 35: **Cemento P- 35**

Cemento Portland 45: **Cemento P- 45**

Cemento Portland 55: **Cemento P- 55**

NC 96:2011 (Cemento con adición activa-Especificaciones)

El producto se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo al % de adición y a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en (MPa).

Cemento Portland Puzolánico:

Cemento Portland Puzolánico 25 (con un % adición activa natural entre 6 y20): **Cemento PP-25**

Cemento Portland Puzolánico 35 (con un % adición activa natural entre 6 y20): **Cemento PP-35.**

Cemento Puzolánico: Cemento Portland 25 (con un % de adición activa natural entre 21 y 35): **Cemento PZ-25.**

1.1.3 Estrategias para disminuir las afectaciones al medio ambiente en la producción de cemento.

En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂, ya que más del 50% del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer (Alujas, 2010). Se estima que por cada tonelada de cemento producida se emite entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO₂ (Habert, 2010), lo que llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre 5 – 8 % del CO₂ a escala global (WBCD -CSI, 2012)

Según la *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) para el 2050 habrá un incremento de la producción que alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento y otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones. Este incremento elevará a su vez los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno , 2014). Debido a las emisiones de CO₂ y las grandes cantidades de energía que demanda la fabricación de cemento que influyen

significativamente en sus costos de producción y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínquer (Castillo, 2010) (Fernández, 2013).

Como se mencionó anteriormente una de las nuevas estrategias que se vienen desarrollando es **la mejora en la eficiencia de los procesos de producción de cemento**. Con la transición tecnológica del proceso húmedo al semi-húmedo, semi-seco o seco, se puede lograr una reducción considerable en los consumos energéticos requeridos durante la combustión de las materias primas. Se estima que los procesos húmedos consumen como promedio entre 5.3 – 7.1 GJ/t de clínquer y el proceso seco consume entre 3.2 – 3.5 GJ/t de clínquer. En el proceso de molienda también se han evidenciado algunas innovaciones como son el desarrollo e implementación de nuevos tipos de molinos como el de rodillos de alta presión y el de rodillos horizontales donde se emplea de un 20 – 50 % menos de energía eléctrica que con los tradicionales molinos de bolas (Vizcaíno , 2014).

Otra de las medidas que se han puesto en práctica en la industria del cemento es **el uso de combustibles alternativos** ya que más del 90 % de la energía usada en la producción de cemento procede originalmente de la quema de combustibles. La fuente energética más usada para la producción de cemento la constituye el carbón, que por su composición es muy contaminante, por lo que al reducir el contenido de carbón de los combustibles se logra reducir las emisiones de CO₂. Una práctica de ello es el empleo de gas natural, pero los precios de este último se han elevado de manera sostenida en el mercado internacional y no son competitivos con los precios del carbón, además de ser una fuente altamente demandada por otros sectores (CSI, 2010) (Cembureau & Oficemen, 2012). La utilización de productos de desecho provenientes de otras industrias como combustibles alternativos ofrece una gran oportunidad ante esta problemática. Estos pueden ser gaseosos como lo son el gases de refinería, los gases del proceso de craqueado del petróleo, pueden ser líquidos como los solventes libres de halógeno, aceites minerales o pueden ser sólidos como los residuos de la agricultura, neumáticos y plásticos. El uso de estos combustibles no solo es menos costoso, sino que puede reducir las emisiones de CO₂ de 0.1 – 0.5 toneladas por tonelada de cemento, comparado con los combustibles fósiles, además de contribuir al reciclaje de residuales industriales (Vizcaíno , 2014).

La reducción del factor de clínquer en el cemento a través del empleo de otros productos reactivos constituye una de las líneas de trabajo establecidas por la industria del cemento en su camino hacia la sostenibilidad ambiental. Del total de emisiones de CO₂, aproximadamente el 40 % proviene de la quema de combustibles y el consumo de energía eléctrica, mientras que el 60 % restante es causado por la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de fabricación del clínquer (CSI, 2010). Los materiales que se emplean como sustitutos del clínquer y que reaccionan con hidróxido de calcio son llamados comúnmente Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

El factor de reducción de clínquer es limitado por la reducción de la resistencia, sobre todo a edades tempranas y algunos MCS provocan un incremento en la demanda de agua, que tiene un efecto negativo en la reología. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C618-03 para cenizas volantes y puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de los óxidos de Si, Al y Fe expresados como por ciento en masa, sea superior al 70% (Alujas, 2010) A pesar de los efectos mencionados anteriormente, el impacto que causa la utilización de estos materiales con respecto a la reducción de las emisiones de CO₂ y la posibilidad de aumentar de los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados, el empleo de MCS como sustitutos del clínquer en la producción de cementos mezclados constituye una de las mejores alternativas para contrarrestar el daño al medio ambiente en nuestro país (Martirena, 2011).

El aumento de los niveles de sustitución de clínquer ha estado liderado por las regiones con economías emergentes, como Latinoamérica, India y China, que se encuentran por encima de la media mundial (Vizcaíno , 2014).

1.1.4 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)

El empleo de adiciones minerales para la producción de cementos mezclados no solo trae beneficios ecológicos, sino que contribuye a la mejora de algunas 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). Dentro del amplio grupo de los MCS se encuentran las puzolanas, las escorias de alto horno y los materiales empleados como filler (Morales, 2010).

Según la norma ASTM C 618-92 las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos las cuales por si solas poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Las puzolanas se dividen en dos grupos las naturales y las artificiales (Massazza, 1993). Las naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silícea, son rocas naturales y su formación se produce en zonas volcánicas del planeta, donde la proyección violenta de magma en la atmósfera trae consigo la formación de material vítreo. Las puzolanas naturales se presentan en forma de rocas piroclásticas, materiales de origen mixto alterado y rocas clásticas. Dentro de estas se encuentran: las cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas (zeolitas) y tierras de diatomeas (diatomitas) (Betancourt Rodríguez, 1997)(Martirena, 2003).

Las puzolanas artificiales son sub-productos industriales y materiales tratados térmicamente, existen varios tipos, las cenizas volantes, arcillas activadas o calcinadas térmicamente, escorias de fundición, microsílíce, y las cenizas de residuos agrícolas como es el caso de las cenizas de cáscara de arroz (Betancourt Rodríguez, 1997). Las escorias de alto horno son un sub-productos de la industria siderúrgica y constituyen, después de las cenizas volantes, el segundo MCS empleado en la industria del cemento (Vizcaíno , 2014).

La alta demanda de muchos de los productos mencionados anteriormente, su limitada disponibilidad y los significativos incrementos en sus precios en el mercado (Blanco, 2009) han tenido un impacto directo en los productores de cemento de países en vías de desarrollo, donde estos MCS no están de forma general disponibles, y tienen que ser traídos desde países industrializados para ser usados, por lo que se han empleado otros MCS como son los desechos agro-industriales, entre ellos los de las producciones de arroz y caña de azúcar, cuya reactividad ha sido ampliamente probada (Salas, 2009), pero su uso práctico en la producción industrial de cemento se encuentra igualmente limita por razones económicas, principalmente los altos costos asociados con transportación y procesamiento (Nair , 2008).

El carbonato de calcio en forma de piedra caliza y las arcillas calcinadas, ante estas problemáticas, constituyen alternativas interesantes para países industrializados y en vías de desarrollo.

El carbonato de calcio es el mineral más abundante y disponible para la producción de cemento. La piedra caliza es usada habitualmente para la producción del clínquer de cemento Portland, pero también puede ser usada en su estado natural, finamente molida, como adición mineral. Se ha demostrado que adiciones entre 2 % – 5 % intermolidas con el clínquer no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora. En este caso, el carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel, una parte reacciona sinérgicamente con el aluminato tricálcico del cemento, formando monocarbo y hemicarbo-aluminatos, que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia. La otra parte de la caliza actúa como relleno inerte, proporcionando superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción y favoreciendo con ello las resistencias iniciales (Lothenbach, 2008).

Las arcillas activadas o calcinadas artificialmente son materiales que en estado natural tienen muy baja reactividad, la estructura cristalina de estos es alterada o destruida cuando se someten a un tratamiento térmico a temperaturas entre 700°C -900°C resultando una puzolana muy reactiva, ejemplo el polvo obtenido a partir de los residuos de la quema de cerámica roja. En el proceso de calcinación de las arcillas se extraen las moléculas de agua absorbidas y las combinadas químicamente, formándose una estructura amorfa que es la que reacciona con la cal y es la que se conoce como la fuente de la actividad puzolánica. Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los alumino-silicatos formados a mayores presiones y temperaturas, además constituyen más del 70% de la corteza terrestre. Dentro de las arcillas calcinadas, el metacaolín (MK) es el material puzolánico más estudiado y el único que existe en el mercado como un producto comercial. Es una puzolana de alta reactividad que se obtiene a partir de la calcinación bajo condiciones controladas de arcillas caoliníticas de alta pureza (Alujas, 2010).

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 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 35 % en dependencia del tipo del material cementicio utilizado (Turanli , 2004).

El metacaolín ha sido usado como componente en mezclas ternarias de cemento Portland en combinación con escorias o cenizas volantes. Con el uso de metacaolín hay un aumento de la resistencia al ataque de los sulfatos, se incrementa la resistencia a la reacción álcali – sílice, y hay una disminución de la permeabilidad de los hormigones que trae consigo la disminución de la corrosión del acero de refuerzo. La disminución de la permeabilidad se debe a que 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 (Dopico & Martirena, 2008). El incremento en la resistencia ante sulfatos debido al empleo de MK puede ser explicado por el consumo del hidróxido de calcio que reduce la posibilidad de formación de yeso expansivo (Morales, 2010).

En la actualidad se han realizado estudios sobre el comportamiento de un nuevo aglomerante con sustituciones del 15, 30, 45 y 60 % en masa del cemento Portland por la combinación metacaolín – caliza. Los resultados demuestran que hasta el 45 % de sustitución, se obtienen resistencias mecánicas superiores al cemento Portland, desde edades tempranas como los 7 días e incluso para sustituciones del 60 % se logra el 93 % del rendimiento con respecto al cemento Portland (Vizcaíno, 2014).

1.1.5 Reacciones puzolánicas

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. 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 Portland.

La reactividad puzolánica de materiales provenientes de la activación térmica de las arcillas, dependen casi en su totalidad del tamaño de la partícula, el área de superficie específica y la mineralogía de las fases arcillosas. Si el material posee mayor superficie específica o finura provoca que aumente la velocidad de reacción cal-puzolana (Castillo, 2010).

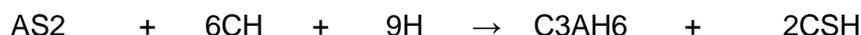
A partir de la reacción de las puzolanas con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento se forman nuevos productos de hidratación que son los

responsables de la mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón (Alujas, 2010).

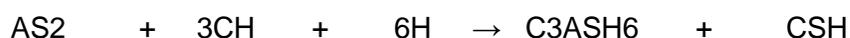
Durante la interacción entre el hidróxido de calcio, la sílice y la alúmina de las arcillas calcinadas, ocurren las siguientes reacciones:



(Metacaolín) (Portlandita) (Agua) (Tetracalcioaluminato) (Silicato de calcio hidratado)



(Metacaolín) (Portlandita) (Agua) (Tricalcioaluminato) (Silicato de calcio hidratado)



(Metacaolín)(Portlandita) (Agua) (Stratlingita o gehhelenita)(Silicato de calcio hidratado)

Uno de los efectos físicos que ocurren producto de la adición de una puzolana al Cemento Portland Ordinario (CPO), es el aumento de la compacidad por efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional, que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CPO. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del por ciento de sustitución. Otro efecto es el de dilución, debido al cual se produce un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas, lo que favorece la reacción de hidratación (Dopico & Martirena, 2008).

La actividad puzolánica trae consigo un grupo de ventajas como son la disminución del contenido de cal libre en la mezcla para valores menores a un 30% de sustitución del CPO, proporciona un efecto acelerador en la hidratación de la fase alita del clínquer, acelera el tiempo de fraguado (inicial y final) de la mezcla, provoca un desplazamiento de los diámetros de poros hacia valores más pequeños (refinamiento de la estructura de poros) que conlleva a la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como la portlandita presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico (Rodríguez , 2013).

1.1.6 Cemento de Bajo Carbono LC3 Industrial

En La Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, se desarrolla a través del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), un Proyecto titulado “Utilización de arcillas calcinadas en la formulación de cementos de bajo contenido de clínquer”, este forma parte de los resultados de un trabajo de investigación colaborativo, realizado desde el 2005, entre la Universidad Politécnica Federal de Lausana, en Suiza; la UCLV, el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría y la fábrica de cemento Siguaney, de Sancti Spíritus. Dicho proyecto tiene como objetivo general, potenciar la implementación de la producción de un cemento de muy bajo contenido de clínquer, como una medida para la mejora de la eficiencia de la producción de cemento en Cuba (CIDEM, 2013).

El proyecto antes mencionado permitió producir de manera industrial, por primera vez en Cuba y el mundo, un cemento ecológico más económico y con una menor carga contaminante. El 3 de abril del 2013 en la fábrica espirituana Siguaney se llevó a cabo la producción de 120 toneladas de cemento de bajo carbono, denominado “SIG B45” y con este se montó un programa completo de utilización, que incluyó la producción de una variada gama de productos, para comprobar su uso eficiente en aplicaciones sin acero de refuerzo, como la producción de bloques de hormigón, tejas de techo, y en general en todos los trabajos de terminación (Zerquera, 2013).

El cemento “SIG B45” producido industrialmente o como también se le conoce Cemento de Bajo Carbono LC3, es un cemento ternario de base clínquer – arcilla calcinada – caliza, con una proporción aproximada de 48% de clínquer, 45% de arcilla calcinada más carbonato de calcio y un 7% de yeso. En la figura 1.1 se puede observar una comparación en cuanto a su composición con dos de los cementos más usados en la industria cubana, el P-35 y el PP-25.

Sus propiedades químicas, físicas y mecánicas obtenidas en condiciones industriales se pueden observar en la tabla 1.1.

Según los resultados de resistencia a la compresión el cemento LC3 producido a escala industrial en condiciones tecnológicas no optimizadas y con un contenido de clínquer de aproximadamente 50 %, satisface los requisitos establecidos en la NC 96: 2011 para cementos mezclados y clasifica como PZ-25 a pesar de exceder los límites de adición establecidos de 35 %. Los elementos prefabricados producidos a escala industrial a partir de

este aglomerante mostraron buenos resultados en sus propiedades mecánicas y de durabilidad expresada a través de la permeabilidad (Vizcaíno , 2014).

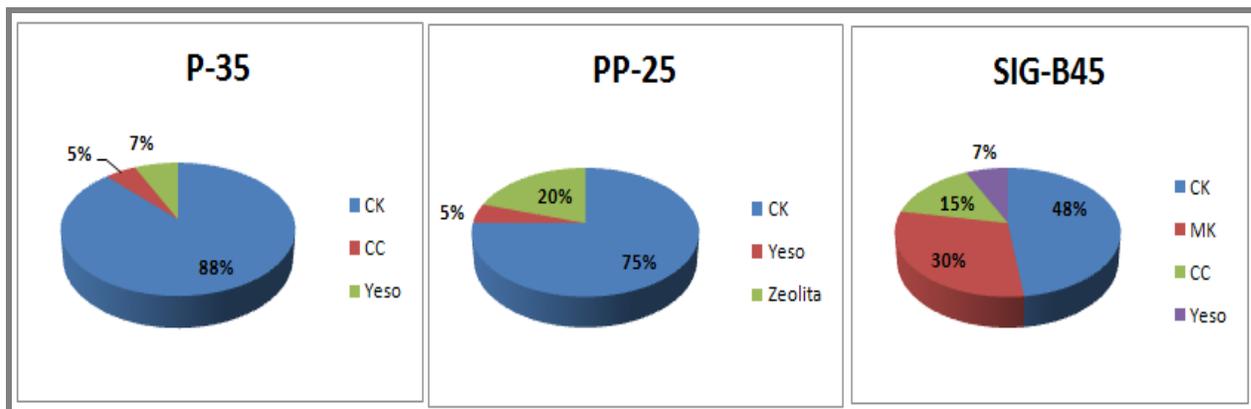


Figura 1.1: Composición del cemento P-35, el PP-25 y el SIG-B45

Tabla 1.1: Propiedades del cemento de bajo carbono SIG-B45

Composición química	Composición en óxidos [%]									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RI	PPI	CaO libre	Total
	27.3	4.6	4.6	49.8	1.3	3.7	12.6	7.1	0.9	98.4
Ensayos físicos	Proporción promedio de los componentes [%] ^b									
	Clinker			Arcilla calcinada/ carbonato de calcio				Yeso		
	50.0			41.1				8.9		
Ensayos mecánicos	Retenido tamiz 4900	Blaine	Peso específico	Consist. Normal	Frag. inicial	Frag. final	Estabilidad de volumen			
	%	cm ² /g	g/cm ³	%	Min.	Horas	mm			
	12.0	4190	2.9	25.0	135	2.9	0.3			
Ensayos mecánicos	Resistencia a la compresión [MPa]									
	3 días	7 días	28 días							
	11.0	17.5	30.3							

Fuente: Tesis de Doctorado de Leng Maday Vizcaíno Andrés 2014

En cuanto a sus propiedades el cemento “SIG B45” es más sensible a la carbonatación en comparación con el cemento Portland debido fundamentalmente a su menor contenido de portlandita. El comportamiento ante la penetración de cloruros es 10 veces superior al cemento Portland, lo que se atribuye al refinamiento de la estructura de poros y la mayor tortuosidad producida por la reacción puzolánica (Vizcaíno , 2014).

Con la producción industrial de este cemento de bajo carbono las emisiones de CO₂ estimadas muestran reducciones superiores a los 300 kg CO₂/t de cemento con respecto al P-35 y 200 kg CO₂/t de cemento respecto al PP-25.

La reducción del costo total de producción del cemento LC3 es del 15 % con respecto al P-35 y 5 % con respecto al PP-25 bajo las condiciones de fabricación de la fábrica Siguaney (Vizcaíno , 2014).

Tanto la valoración económica como ambiental de la producción a escala industrial del cemento de bajo carbono LC3 demuestran la viabilidad de su implementación para países en vías de desarrollo como Cuba, buscando la manera de incrementar los volúmenes de producción de cemento para satisfacer la demanda prevista para los próximos años con el fin desarrollar la infraestructura de manera sostenible.

1.1.7 Producción local de cemento LC3 a pequeña escala

Según estudios realizados por Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se ha demostrado que es posible producir a pequeña escala, un cemento ternario de bajo carbono. Este cemento llamado LC3, se produce mezclando cemento P-35, polvo obtenido a partir de residuos de la producción de cerámica roja y piedra caliza. La proporción es de 50% de cemento P-35, 30% de arcilla calcinada o polvo de cerámica roja y 20 % de caliza. La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland. Esta reacción da lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos) (Castillo, 2010).

Tanto la arcilla calcinada como la caliza deben tener las condiciones idóneas para su utilización en la producción de este cemento, las arcillas calcinadas que provienen de la quema de piezas de cerámica roja en hornos que alcanzan una temperatura de 700°C a 900°C debe tener la mayor pureza posible para lograr una adecuada reactividad puzolánica, la caliza o el polvo de piedra debe presentar como componente principal, el carbonato de calcio. Ambas con una humedad inferior al 9% y después de molidas una finura menor o igual al 10% retenido en el tamiz de 90µm. La finura es una de las propiedades más importantes de estos cementos y está ligada a su valor hidráulico ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado del cemento, por lo tanto al aumentar finura también aumenta la resistencia mecánica.

El cemento LC3 producido artesanalmente puede alcanzar prestaciones similares al cemento PP-25 y este es idóneo para el uso en aplicaciones de albañilería, la producción de hormigones para pisos, cimentaciones y la producción de una variada gama de elementos prefabricados de pequeño formato como bloques, baldosas hidráulicas y tejas de micro-concreto (Martirena, 2015).

La producción local de cemento de bajo carbono se puede llevar a cabo en talleres artesanales que cuenten con la maquinaria y la infraestructura adecuada para acopiar las materias primas, producir el cemento y posteriormente almacenarlo de forma segura. La mezcla y el molido de las materias primas se realizan en molinos de bolas tanto de operación discontinua (el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación el molino se abre para a continuación separar el mineral de los cuerpos molturantes, estos pueden ser el MB-600 o el MB-800) como continua (el molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo, estos pueden ser el molino CR 94 o el molino Ricote producido en Cuba por el MINAZ en la década del 90).

La producción del LC3 de forma local trae consigo grandes ventajas ya que esta se puede llevar a cabo con bajos índices de consumo de energía, es una producción descentralizada que se puede desarrollar en cualquier lugar y pose bajos costos de inversión inicial.

1.2 Talleres de producción de prefabricado de pequeño formato.

Los talleres de producción de prefabricado de pequeño formato son talleres donde se elaboran elementos de hormigón de forma descentralizada como: boques, tejas de micro-concreto, adocretos, celosías, baldosas hidráulicas, etc.

Estas instalaciones deben contar con un conjunto de máquinas, las que unidas a otros equipos y accesorios de la producción de materiales, llegan a conformar un conjunto productivo a modo de una pequeña industria; ejemplo de estas máquinas son la Vibrocompactadora para producir bloques huecos de hormigón con sus juegos de moldes para diferentes productos; molinos de bolas para la elaboración de cemento, mesas vibratorias y hormigoneras. Dentro de estas instalaciones debe existir un orden de las áreas y del equipo de trabajo que garantice un trabajo fluido, adecuado y de forma eficiente de modo que se puedan elaborar los diferentes productos a un costo reducido y con la mayor

calidad posible (Herrera, 2008). La puesta en funcionamiento de estos talleres artesanales trae innumerables ventajas como son (CIDEM, 2015):

- Aprovechamiento de fuentes locales de materia prima.
- Oportunidades para el empleo de fuerza de trabajo de poca calificación.
- Producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales o de grandes ciudades.
- Bajos costos en la inversión inicial, y recuperación rápida de esta.
- Comercio local de productos prefabricados de pequeño formato, con el objetivo de disminuir el costo de transportación.
- Utilización de tecnologías sencillas, con equipos producidos en el país, de bajo consumo energético y fáciles de reparar.

1.2.1 Producción de bloques huecos de hormigón

A inicios del siglo XIX en Inglaterra se origina uno de los grandes avances en el campo de la construcción, la fabricación del bloque de concreto. Estos bloques eran sólidos, sumamente pesados, en los que se utilizaba la cal como material cementante. La introducción del cemento Portland y su uso intensivo, abrió nuevos horizontes a este sector de la industria y a principios del siglo XX aparecieron los primeros bloques huecos para muros, la ligereza de estos nuevos bloques significó, por sus múltiples ventajas, un gran adelanto para el área de la construcción en relación a etapas anteriores (Arrieta & Peña, 2001).

La experiencia internacional en construcción utilizando bloques de hormigón ha demostrado el excelente comportamiento de este sistema constructivo y su adaptabilidad a cualquier tipo de edificación. Sus propiedades tanto físicas como mecánicas, su versatilidad, unidas a su costo de fabricación favorecen su utilización; a la vez que su facilidad para cambiar formas, colores y texturas lo hacen adaptable a cualquier requerimiento, especialmente a las construcciones en serie de baja altura. Es en este tipo edificatorio donde todas las ventajas del sistema se muestran más ostensibles, al permitir una economía en materiales y mano de obra que difícilmente puede alcanzarse con otros sistemas constructivos (Alvarez Alonso , 1990).

Sólo en EE.UU y Canadá se producen más de 5.000 millones de unidades equivalentes al bloque de 20cm x 20cm x 40cm, destinados a una gran variedad de aplicaciones, tales como edificación de viviendas, mampostería estructural en edificios de gran altura, tabiques divisorios, chimeneas, piletas de natación, silos, muros de sostenimiento, cámaras subterráneas, barreras sónicas, entre otras (Gordillo, n.d.).

La producción de bloques huecos de hormigón se puede llevar a cabo tanto de forma industrial como en talleres que cuenten con el equipamiento necesario para elaborar los mismos. Grandes avances se han logrado a nivel mundial en la fabricación de forma industrial, ejemplo de ello es la empresa argentina Corblock que desde hace más de 40 años fabrica productos de hormigón de máxima calidad y en la actualidad se ha modernizado con una nueva línea de producción automatizada diseñada por la empresa francesa Quadra que fabrica equipos para la industria del hormigón, la nueva instalación la cabezada la máquina de producción de bloques del tipo Q12 HP, que se beneficia de una tecnología sofisticada, de alto rendimiento con un tiempo de ciclo 13 segundos por bandeja, con 18 bloques huecos cada una y cuenta además con un software de control de alta calidad, que le permite a un operador controlar toda la producción (Quadra, 2015).

La calidad de los bloques depende de cada etapa del proceso de fabricación, fundamentalmente de la cuidadosa selección de los agregados, la correcta determinación de la dosificación, una perfecta elaboración en lo referente al mezclado, moldeo y compactación y de un adecuado curado.

Las materias primas recomendadas para la producción de los bloques son: cemento, arena, gravilla, agua y aditivos en algunas ocasiones. Todas estas materias primas deben cumplir con las normas que garantizan su empleo, además de que en el taller se debe garantizar un adecuado almacenamiento del cemento y de los áridos para evitar la contaminación de los mismos (CIDEM, 2011).

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 un contenido de cemento en el rango de 190-270 Kg/m³ y alcanza una resistencia a compresión bruta a los 28 días entre 2.5-7.0 MPa (Aguiar Pérez, 2014).

1.2.2 Bloques huecos de hormigón. Características.

El bloque de hormigón es uno de los materiales de construcción más populares, por su gran utilización, donde se ahorra gran cantidad de mortero con relación a la utilización del ladrillo, al cual sustituye, además sus caras exteriores son más resistentes a la humedad.

Los bloques huecos de hormigón son piezas prefabricadas que han de resistir los esfuerzos a que quedan sometidos una vez formado los muros y proporcionar el debido aislamiento térmico y acústico (Roces Arbesú, 2007). Tienen forma ortoédrica, con dimensiones exteriores no superiores a 500mm, con una relación alto/ancho inferior a 6, y alto/largo inferior a 1, sin armadura de refuerzo alguna y con densidades comprendidas entre 1.700kg/m^3 y 2.200kg/m^3 . Generalmente posee cavidades interiores transversales que pueden ser ciegas por uno de sus extremos y cuyos ejes son paralelos a una de las aristas. (Brito & Rivera, 2005)

Los bloques huecos de hormigón tienen propiedades físicas, mecánicas, acústicas y térmicas. Dentro de sus propiedades físicas están la densidad que nos permite determinar si un bloque es pesado o liviano, la absorción que se relaciona con la permeabilidad de la pieza y con la resistencia que puede desarrollar y la eflorescencia por capilaridad provocada por la presencia de sales y humedad en el elemento. Dentro de sus propiedades mecánicas está la resistencia a la compresión que es el índice de calidad más empleado para albañilería y en ella se basan los procedimientos para predecir la resistencia de los elementos estructurales. En cuanto a sus propiedades térmicas los bloques tienen un coeficiente de conductividad variable, en el que influyen los tipos de agregados que se utilicen en su fabricación y el espesor del bloque. Por último en lo referente a la absorción y a la transmisión del sonido, los bloques tienen capacidad de absorción variable de un 25 % a un 50% (Arrieta & Peña, 2001).

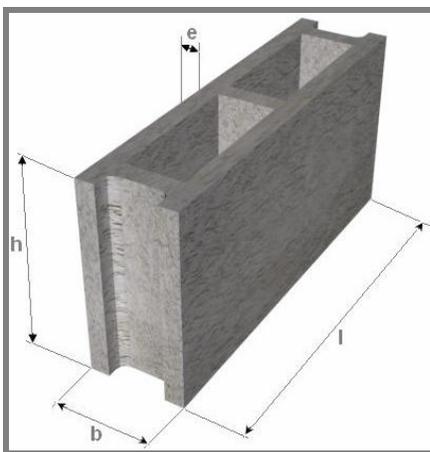
1.2.3 Clasificación de los bloques huecos de hormigón según la Norma Cubana.

Según la NC 247-2010 los bloques huecos de hormigón se clasifican por tipos en función de las dimensiones principales y las propiedades físicas y mecánicas respectivamente. Los tipos de bloques de hormigón se definen por el ancho de la base. En la tabla 1.2 y en la figura 1.2 se pueden observar los diferentes tipos de bloque.

Tabla 1.2: Dimensiones y tolerancias de fabricación según el tipo de bloque

Tipo de bloque	l (±3 mm)	b (±3 mm)	h (±3 mm)
I	495	195	195
	395		
II	495	145	
	395		
III	495	95	
	395		
IV	495	60	
	395		

Fuente: Tabla 1 de la NC 247-2010

Figura 1.2: Bloque hueco de hormigón

Las propiedades físicas y mecánicas que deben cumplir los bloques huecos de hormigón según su tipo se reflejan en la tabla 1.3.

Los bloques con respecto a la rectitud de aristas y planeidad de sus caras, deben cumplir con las condiciones que se muestran en la tabla 1.4 según su utilización.

Tabla 1.3: Índices físico mecánicos según el tipo de bloque

Tipo de bloque	Resistencia a la compresión		Absorción máxima (%)
	f'c mínima a los 7 días(MPa)	f'c mínima a los 28 días(MPa)	
I	5.6	7.0	8.0
II	4.0	5.0	10.0
III	2.0	2.5	-
IV	2.0	2.5	-

Fuente: Tabla 2 de la NC 247-2010

Tabla 1.4: Limitaciones con respecto a la rectitud de aristas y planeidad de caras

	Rectitud de aristas	Planicidad de caras
Bloques cara vista	Flecha Máxima 0.5	Flecha Máxima 0.5
Bloques a revestir	Flecha Máxima 1	Flecha Máxima 1

Fuente: Tabla 3 de la NC 247-2010

1.2.4 Máquina utilizada para la producción a pequeña escala de bloques huecos de hormigón. Características.

La máquina utilizada para la producción a pequeña escala de bloques huecos de hormigón es la máquina vibrocompactadora llamada Vibracom, producto de una tecnología inicialmente importada desde Colombia cuando comenzó el proyecto “Cenizas” en el año 1996, con el nombre de “Maquiblok” y que posteriormente en el año 1999 fue diseñado mediante la ayuda de algunos ingenieros especializados en el tema.

La máquina Vibracom VIB – 002 es un equipo especialmente diseñado para la fabricación de elementos ligeros de hormigón de diferentes dimensiones y formas. Se suministran básicamente moldes para la producción de bloques normalizados de 20cm de alto x 40cm de largo, además de 10cm y 15cm de ancho, aunque a solicitud expresa de los clientes, se pueden suministrar moldes para la fabricación de otros elementos.

Los moldes intercambiables pueden ser removidos de forma sencilla, por lo que la máquina VIB – 002 resulta un equipo versátil de amplias posibilidades. Se recomienda especialmente

para su uso con mezclas con altos por cientos de sustitución de cemento Portland por materiales puzolánicos, logrando gran calidad y terminación de los elementos producidos.

La máquina está 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 de 220 voltios de corriente alterna trifásica 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. El peso total del equipo es de 900kg (CIDEM, 2011)



Figura 1.1: Máquina Vibracom

1.3 Conclusiones parciales

- El cemento Portland es el material de construcción más utilizado en el mundo pero en su proceso de fabricación grandes cantidades de dióxido de carbono son liberadas a la atmósfera y demanda grandes cantidades de energía. Debido a estos factores que influyen significativamente en sus costos producción y sostenibilidad ambiental, se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable.
- Las nuevas formulaciones para la producción de cemento con el empleo de Materiales Cementicios Suplementarios como sustitutos del clínquer en la producción

de cementos mezclados constituye una de las mejores alternativas para contrarrestar el daño al medio ambiente en nuestro país.

- El cemento “SIG B45” o el LC3 es un cementos ternarios de base clínquer – arcilla calcinada – caliza que satisface los requisitos establecidos para cementos mezclados según la NC 96:2001, con su producción se reducen considerablemente las emisiones de CO₂ y resulta mas económica con respecto a los cementos Portland fabricados en nuestro país.
- El cemento LC3 puede ser producido artesanalmente y puede alcanzar prestaciones similares al cemento PP25, lo que lo hace idóneo para el uso en aplicaciones de albañilería, la producción de hormigones para pisos y la producción de una variada gama de elementos prefabricados de pequeño formato como bloques, baldosas hidráulicas y tejas de micro-concreto.
- Los bloques huecos de hormigón son 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 aglomerante sobre la sustitución parcial del contenido del clínquer por la combinación de arcillas calcinadas con caliza.

Capítulo II: Características de los materiales y descripción de los procesos de producción del cemento LC3 artesanal y de los bloques huecos de hormigón.

2.1 Generalidades

En este capítulo se exponen las características de los materiales que se utilizaron para la fabricación a pequeña escala de dos cementos LC3, uno en un taller particular en el municipio de Santa Clara y el otro en el taller de Mantenimiento Constructivo de Manicaragua, ambos cementos con la misma proporción, un 50% de cemento P-35, un 30% arcilla calcinada y un 20% de caliza. Se describen los procesos de obtención de ambos cementos, así como los ensayos realizados a los mismos, se detalla el proceso de fabricación de los bloques huecos de hormigón del Tipo III (10cm de ancho) según la NC 247-2010 y los ensayos a que fueron sometidos. Además se fabricarán probetas de hormigón de 20 MPa con los cementos LC3 artesanales a las que se les realizarán el ensayo de resistencia a compresión.

2.2 Diseño del experimento

El diseño experimental para producir un cemento LC3 artesanalmente, que mantenga las propiedades físico-mecánicas exigidas según la normativa vigente para cementos con adición puzolánica, así como bloques huecos de hormigón y hormigón masivo de 20 MPa siguió la siguiente metodología:

1. Selección y procesamiento de las materias primas utilizadas en la elaboración de los cementos, los bloques y el hormigón masivo de 20 MPa.
2. Caracterización del cemento P-35, la arcilla calcinada y los áridos empleados como materias primas para la elaboración de los cementos y los bloques huecos de hormigón.
3. Obtención a pequeña escala de los cementos LC3 con una proporción de 50% de cemento P-35, un 30% arcilla calcinada y un 20% de caliza.

4. Realización del ensayo de finura, los ensayos de campo según el Manual de Calidad del Cemento de Bajo Carbono LC3 y el ensayo del minicono a las pastas de cemento.
5. Fabricación de bloques huecos de hormigón y de probetas de hormigón masivo de 20 MPa.
6. Realización de los ensayos a los bloques huecos de hormigón según lo establece la NC 247-2010.
7. Realización del ensayo a compresión a las probetas de hormigón según lo establece la NC 244-2005.

2.3 Características de las materias primas utilizadas para la fabricación de los cementos LC3 artesanales.

Los materiales empleados para la elaboración de los cementos LC3 artesanales fueron cemento P-35, arcilla calcinada proveniente de la molturación de ladrillos o rasillas de cerámica roja, gravilla y polvo de piedra.

2.3.1 Cemento P-35

Según la NC 95-2011 los requisitos que cumple el cemento P-35 son las que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades del cemento P-35

Índice	Requisitos	UM	P-35
Físico	Superficie específica Blaine (min.)	cm ² /g	2800
	Tiempo de fraguado inicial (min.)	min	45
	Tiempo de fraguado final (máx.)	h	10
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	mm	10
Mecánicos	Resistencia a la compresión (min.)	3 días	(MPa) 17
		7 días	25
		28 días	35
Químicos	Pérdida por ignición (máx.)	%	4
	Residuo insoluble (máx.)	%	4
	Óxido de Magnesio (máx.)	%	5
	Trióxido de Azufre (max.)		3.5

Fuente: Tabla 1 de la NC 95-2011

2.3.2 Gravilla

Para la fabricación del cemento LC3 de Santa Clara se empleó gravilla procedente de la cantera “Mariano Pérez Valí”, conocida como “El Purio”, en el municipio de Encrucijada, provincia de Villa Clara. Su caracterización se realizó en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Villa Clara y se muestra en las Tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2: Características físico-mecánicas de la gravilla del Purio

Ensayos		
Material más fino que el tamiz - 200		
	Pesos(g)	% pasado por Tamiz - 200
Peso inicial seco	2528.73	0.3
Peso final seco	2519.92	
Partículas de arcillas		
	Pesos(g)	% de partículas de arcillas
Peso inicial	2279.18	0.02
Peso final	2278.83	
Peso Específico		
	Pesos(g/cm ³)	Incertidumbre
PEC	2.54	0.010
PES	2.60	0.007
PEA	2.69	0.007
% Absorción	2.1	0.17
Peso Volumétrico		
	Pesos(kg/m ³)	Incertidumbre
Peso volumétrico suelto	1364	28.02
Peso volumétrico compactado	1509	28.02

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 2.3: Análisis granulométrico de la gravilla del Purio

Tamices		% Pasado
SI	mm	
1	25.4	100
3/4	19.1	94
1/2	12.7	28
3/8	9.52	6
4	4.76	0

Fuente: Elaborado por el autor

2.3.3 Polvo de piedra

Para la fabricación del cemento LC3 de Manicaragua se empleó arena natural o polvo de piedra procedente de la cantera El Purio. La arena se obtiene producto de la trituración de las rocas de origen calizo y fue caracterizada en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Villa Clara. Su caracterización se ilustra en las Tablas 2.4 y 2.5.

Tabla 2.4: Características físico-mecánicas del polvo de piedra del Purio

Ensayos		
Material más fino que el tamiz - 200		
	Pesos(g)	% pasado por Tamiz - 200
Peso inicial seco	558.35	11.2
Peso final seco	496.08	
Partículas de arcillas		
	Pesos(g)	% de partículas de arcillas
Peso inicial	145.36	1.77
Peso final	142.78	
Peso Específico		
	Pesos(g/cm ³)	Incertidumbre
PEC	2.67	0.022
PES	2.72	0.021
PEA	2.81	0.020
% Absorción	1.8	0.17
Peso Volumétrico		
	Pesos(kg/m ³)	Incertidumbre
Peso volumétrico suelto	1545	28.02
Peso volumétrico compactado	1818	28.03

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 2.5: Análisis granulométrico del polvo de piedra del Purio

Tamices		% Pasado
SI	mm	
3/8	9.52	100
4	4.76	98
8	2.33	68
16	1.19	46
30	0.59	31
50	0.295	20
100	0.149	8
200	0.074	1

Fuente: Elaborado por el autor

2.3.4 Arcilla calcinada artificialmente obtenida a partir de residuos de la quema de ladrillos y rasillas de cerámica roja

La arcilla calcinada utilizada para la fabricación de los cementos LC3 a pequeña escala es obtenida a partir de los desechos de la producción de ladrillos y rasillas de barro. Los ladrillos fueron fabricados en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Combinado de Cerámica “Sergio Soto” ubicado en el municipio de Manicaragua, mientras que las rasillas se elaboraron en el “Taller de Pedrito” situado en el municipio de Santa Clara.

En el período de cocción, después de colocados los ladrillos dentro del horno se comienza con un precalentamiento durante 10 o 12 horas hasta una temperatura alrededor de 350°C a 400°C. Posteriormente se comienza a elevar la temperatura paulatinamente hasta alcanzar un valor de 900°C a 950°C que es la temperatura de quema (Eloy Cruz, 2014).

Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250°C ocurre la pérdida del agua adsorbida y almacenada en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación). Entre los 400°C y los 950°C ocurre la remoción de los OH- estructurales (deshidroxilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases metaestables, caracterizadas por una alta reactividad química (Nazco, 2014).

2.4 Proceso de fabricación de los aglomerantes a pequeña escala.

En el proceso de fabricación de los dos cementos LC3 artesanales no existen diferencias en cuanto a su proporción, se usará un 50% de cemento P-35, un 20% de caliza y un 30% de material cerámico calcinado a temperaturas entre 600°C y 900 °C. La diferencia radica en que en el cemento de Santa Clara se usa como fuente de materia prima para la adición puzolánica, rasillas de barro calcinadas y gravilla, mientras que en el de Manicaragua se emplean ladrillos de barro y polvo de piedra. Otra diferencia de gran importancia es en el proceso de molienda, ya que en Santa Clara se lleva a cabo con un molino de bolas continuo marca CR 94 y en Manicaragua se utiliza un molino discontinuo MB-800 como se ilustra en el Anexo 3.

2.4.1 Fabricación del cemento LC3 de Santa Clara.

La fabricación de este cemento se llevó a cabo en el “Taller de Pedrito”, ubicado en la Carretera Acueducto, Reparto Sakenaf en el municipio de Santa Clara, provincia de Villa Clara.

Para la obtención de este cemento se usó como adición residuos de rasilla triturada obtenida en el mismo taller y gravilla procedente de la cantera “El Purio”. El uso de rasillas se justifica por presentar buena homogeneidad en su apariencia que indica alta pureza y temperatura adecuada de calcinación. Para la molienda se garantizó que la gravilla y las chamotas de rasillas estuvieran limpias de residuos de otros materiales y con el menor contenido de humedad posible, para poder ser molidas adecuadamente. En el proceso de fabricación se llevó a cabo el siguiente orden de actividades:

1. Secado mediante el asolamiento de la gravilla y los residuos de rasilla para disminuir el contenido de humedad.
2. Trituración de los residuos de rasilla de forma manual, con la ayuda de un martillo (para disminuir su tamaño).
3. Trituración de la gravilla con un molino de martillo hasta una granulometría aproximada de 0-5mm.
4. Dosificación volumétrica de las proporciones de la adición (60% de chamotas de rasilla y 40% de gravilla triturada).
5. Carga del molino con las chamotas de rasilla y la gravilla triturada según la dosificación.
6. Molienda de ambos materiales. Al cabo de 35 minutos comienza a salir el material molido por el otro extremo del molino.
7. Mezclado y homogeneizado de forma manual de la adición con el cemento P-35 (50% de P-35 y 50% de la adición puzolánica).
8. Almacenamiento del cemento garantizando que no se humedezca ni contamine con otros materiales.

2.4.2 Fabricación del cemento LC3 de Manicaragua.

La elaboración de este cemento se realizó en el “Taller de Mantenimiento Constructivo” ubicado en la calle conocida como la Circunvalación Vieja, en el municipio de Manicaragua, provincia de Villa Clara.

Para la fabricación de este cemento se usó como adición residuos de ladrillo de barro y polvo de piedra. Los residuos de ladrillos utilizados provienen de la producción industrial y presentan un alto contenido de arcilla y temperatura de cocción adecuada. El polvo de piedra es procedente de la cantera “El Purio” y su componente principal es el carbonato de calcio. Antes de la molienda se comprobó que dichos materiales presentaran bajos contenidos de humedad para poder ser molidos con buena eficiencia. En el proceso de fabricación se llevó a cabo el siguiente orden de actividades:

1. Secado mediante el asoliamiento del polvo de piedra y de los residuos de ladrillos para disminuir el contenido de humedad.
2. Trituración de los residuos de ladrillo con el molino de quijá.
3. Dosificación volumétrica de las proporciones de la adición puzolánica. (60% de chamotas de ladrillo y 40% de polvo de piedra).
4. Carga del molino con la chamotas de ladrillo y el polvo de piedra según la dosificación.
5. Molienda de ambos materiales por un tiempo de 40 minutos hasta alcanzar la finura recomendada.
6. Carga del molino con el cemento P-35 en una proporción 1:1 con la adición.
7. Mezclado y homogeneizado del cemento P-35 con la adición en el molino por un tiempo de 10 minutos.
8. Extracción del cemento LC3 artesanal.
9. Almacenamiento del cemento LC3 garantizando que no se humedezca ni contamine con otros materiales.

2.5 Descripción de los ensayos realizados a los cementos

A los cementos fabricados artesanalmente, se les realizaron el ensayo de finura mediante el método del tamizado y los ensayos de campo especificados en el “Manual de Calidad del

Cemento de Bajo Carbono LC3” (manual creado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales en el año 2015 para brindar a los productores que emplean la tecnología de fabricación de cemento LC3 a pequeña escala un aseguramiento de la calidad de producción). Además se le realizaron a las pastas de dichos cementos, el ensayo del minicono.

Los ensayos de campo que se realizaron fueron el de Sedimentación, para evaluar la finura del LC3 mediante la velocidad de asentamiento de las partículas en agua, el ensayo Visual-Táctil, el ensayo de la Huella para evaluar la velocidad de fraguado y el de Hidraulicidad para evaluar el carácter hidráulico del cemento.

2.5.1 Ensayo de Finura

En la NC-EN 196-6: 2007 *Cemento Hidráulico- Método de ensayo- Determinación de la finura y la superficie específica* se describen los métodos para determinar la finura del cemento. El método del tamizado sirve únicamente para detectar la presencia de partículas gruesas en el cemento, siendo apropiado para comprobar y controlar el proceso de producción.

Para la realización del método del tamizado primeramente se pesan 100g del cemento LC3. Luego se colocan en el tamiz de 90 micras y se comienza a agitar el tamiz con movimientos lineales, planetarios y de vaivén, además con la ayuda de una brocha se esparcen las partículas de cemento por todo el tamiz hasta que ningún material fino pase a través de él. Después de concluido el tamizado se pesó el por ciento que pasó y por diferencia se halló el por ciento retenido.

2.5.2 Ensayo de Sedimentación

Para la realización de este ensayo primero se vierten en una probeta de 250ml de capacidad, 160ml de agua y 10g de LC3, luego se agita con giros de hasta 180 grados por un tiempo de 10 segundos y se deja reposar. A partir del estado de reposo se mide el tiempo en que la turbulencia alcanza la altura de 80mm (t_1), el tiempo en que la turbulencia marca 30 mm (t_2) y el tiempo en que la mezcla se aclara totalmente (t_3). Si $t_1 > 3$ minutos y $t_2 > 5$ minutos el material cumple los requisitos de finura.



Figura 2.1: Balanza digital

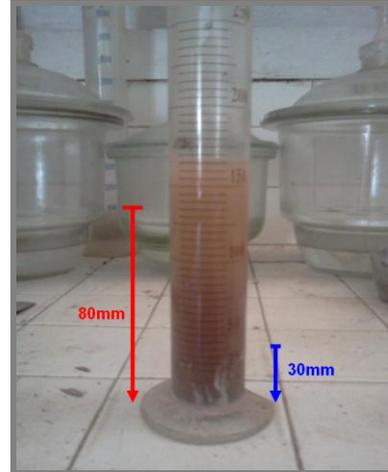


Figura 2.2: Probeta de 250ml

2.5.3 Ensayo Visual- Táctil

Para este ensayo se toman 250ml de cemento LC3 y 250ml de cemento P-35 y se vierten en una bandeja, luego mediante la observación directa y la percepción al tacto de las partículas de las muestras se hace una comparación entre ellas en cuanto a su finura.



Figura 2.3: Ensayo Visual-Táctil

2.5.4 Ensayo de la Huella

En la realización de este ensayo primeramente se elabora una pasta de cemento y agua con una relación $a/c=0.42$, luego esta se coloca en moldes cilíndrico de 100mm de diámetro por 25mm de altura. Después de transcurrida una hora, se deja caer desde una altura de 25cm una bola de acero de 40mm de diámetro con 230g de peso y se registra el diámetro de la huella producida por la bola. Esto se repite una vez cada hora, sobre cada molde diferente hasta que la huella sea legible. Por último se calcula la diferencia entre las huellas mediante la siguiente expresión:

$$\text{Diferencia}(\%) = \frac{\text{Diám.inicial} - \text{Diám.final}}{\text{Diám.inicial}} \times 100$$

Donde Diám.inicial es el diámetro de la huella a las 5 horas y Diám.final es el diámetro de la huella a las 20 horas, si la diferencia calculada es igual o mayor que el 30%, el cemento LC3 cumple el requisito de velocidad de fraguado.



Figura 2.4: Ensayo de la Huella

2.5.5 Hidraulicidad

En este ensayo primeramente se elabora una pasta con 440ml de cemento LC3 y 120ml de agua, con la que se elaboran esferas de 5cm de diámetro aproximadamente, se dejan reposar en un ambiente húmedo por una hora y luego se sumergen en un recipiente con agua durante 24 horas. Al cabo de este tiempo se sacan del agua y se comprueba su dureza. El endurecimiento de las esferas bajo el agua es un indicador del carácter hidráulico de la reacción de hidratación de la pasta cemento que forman las mismas.



Figura 2.5: Bolas de cemento sumergidas en agua



Figura 2.6: Comprobación de la dureza después de 24 horas

2.5.6 Ensayo del Minicono

La laborabilidad de las mezclas es una característica importante que se manifiesta en su estado fresco y determina en gran medida las propiedades a corto, mediano y largo plazo del producto terminado. La determinación de la plasticidad, su variación en el tiempo y la reducción de agua de las pastas de cemento, están basadas en la medición del área de esparcimiento alcanzada como consecuencia de la caída por gravedad, al retirar el minicono que la contiene. Para la realización del ensayo se empleó una relación $a/c=0.42$ y se procedió según como se especifica en la NC 235-2012 *Pastas de cemento- Determinación de la plasticidad y su variación en el tiempo por el método del minicono*.



Figura 2.7: Pastillas de cemento resultantes al levantar el minicono.

2.6 Características de las materias primas utilizadas para la fabricación de los bloques huecos de hormigón

Las materias primas empleadas en la producción de los bloques con el cemento de bajo carbono son: Cemento LC3, árido fino producto de la trituración de las rocas, granito con fracción de 10-5 mm procedente de la trituración de rocas en canteras y Agua. Los ensayos para obtener la caracterización de los áridos se realizaron en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santa Clara.

2.6.1 Árido fino

El árido fino utilizado en la producción de bloques es el polvo de piedra procedente de la cantera “El Purio”. Su caracterización se muestra en la tabla 2.6 y 2.7.

Tabla 2.6: Características físico-mecánicas del Polvo de piedra del Purio

Ensayos			Especificaciones según la NC 251-2005
Material más fino que el tamiz - 200			<5
	Pesos(g)	% pasado por Tamiz - 200	
Peso inicial seco	558.35	11.2	
Peso final seco	496.08		
Partículas de arcillas			<1
	Pesos(g)	% de partículas de arcillas	
Peso inicial	145.36	1.77	
Peso final	142.78		
Peso Específico			
	Pesos(g/cm³)	Incertidumbre	
PEC	2.67	0.022	>2.5
PES	2.72	0.021	
PEA	2.81	0.020	
% Absorción	1.8	0.17	<3
Peso Volumétrico			
	Pesos(kg/m³)	Incertidumbre	
Peso volumétrico suelto	1545	28.02	
Peso volumétrico compactado	1818	28.03	

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 2.7: Análisis granulométrico del polvo de piedra del Purio

Tamices		% Pasado	Especificaciones
SI	mm		
3/8	9.52	100	100
4	4.76	98	90-100
8	2.33	68	70-100
16	1.19	46	45-80
30	0.59	31	25-60
50	0.295	20	10-30
100	0.149	8	2-10
200	0.074	1	

Fuente: Elaborado por el autor

2.6.2 Árido grueso

El árido grueso utilizado para la producción de bloques procede de la cantera Raúl Cepero Bonilla conocida como Palenque, este es producto de la trituración de las rocas y responde a la fracción granito 10-5 mm, sus características físico-mecánicas se realizó en la ENIA de Santa Clara.

Tabla 2.8: Características físico-mecánicas del granito de Palenque

Ensayos			Especificaciones
Material más fino que el tamiz - 200			<1
	Pesos(g)	% pasado por Tamiz - 200	
Peso inicial seco	2547.26	2.3	
Peso final seco	2487.73		
Partículas de arcillas			<0.25
	Pesos(g)	% de partículas de arcillas	
Peso inicial	2063.49	0.03	
Peso final	2062.84		
Peso Específico			
	Pesos(g/cm³)	Incertidumbre	
PEC	2.51	0.010	>2.5
PES	2.58	0.007	
PEA	2.70	0.007	
% Absorción	2.8	0.17	<3
Peso Volumétrico			
	Pesos(kg/m³)	Incertidumbre	
Peso volumétrico suelto	1382	28.02	
Peso volumétrico compactado	1509	28.02	
Partículas planas y alargadas (%)			<10
3.07			

Tabla 2.9: Análisis granulométrico del granito de Palenque

Tamices		% Pasado	Especificaciones
SI	mm		
3/4	19.1	100	-
1/2	12.7	98	100
3/8	9.52	65	85-100
4	4.76	6	15-35
8	2.38	3	0-10

Fuente: Elaborado por el autor

2.6.3 Agua

Aguas potables de distintas fuentes, que se emplean en la práctica diaria para usos comunes.

2.7 Proceso de fabricación de los bloques huecos de hormigón

La fabricación de los bloques se realizó en el “Taller de Mantenimiento Constructivo” ubicado en la calle conocida como la Circunvalación Vieja, en el municipio de Manicaragua, provincia de Villa Clara. La producción de los bloques se hizo con la maquina vibrocompactadora “Vibracom”. Se hicieron bloques de 10cm de ancho, por 20cm de altura, por 40cm de largo y se utilizaron las materias primas caracterizadas anteriormente. Se fabricaron tres series de bloques, dos series con el cemento LC3 de Manicaragua (Serie M y Serie L) usando diferentes dosificaciones y una con el cemento LC3 de Santa Clara (Serie SC). Este proceso fue ejecutado por un personal de mucha experiencia en la elaboración de bloques. En el proceso de producción de los bloques se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- **Dosificación de la mezcla**

El diseño de la mezcla de hormigón para bloques que se usó en la series M y la serie SC, se realizó según el Instructivo Técnico para el uso del Cemento de Bajo Carbono elaborado por el CIDEM en el 2013. El diseño del hormigón se concibió para producir 16 bloques de 10 cm de ancho para cada serie, como se muestra en la Tabla 2.10.

La dosificación empleada en la serie L es la que comúnmente se usa en la producción diaria de bloques en el taller (Tabla 2.11).

Tabla 2.10: Dosificación utilizada para la fabricación de la series M y la serie SC

Materiales	Dosificación	Índice de consumo por bloque
Cemento LC3	28kg	1.75kg
Polvo Purio	53litros	3,31litros
Granito Palenque	68litros	4.25litros
Agua	10kg	0.63kg
R. a/c Amasada	0.36	

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 2.11: Dosificación utilizada para la fabricación de la series L

Materiales	Dosificación volumétrica
Cemento LC3	1
Polvo Purio	3
Granito Palenque	5
Agua	0.3

Fuente: Elaborado por el autor

- **Medición de los materiales componentes de la mezcla.**

La medición del cemento se hizo por peso con una báscula y la medición de los áridos y el agua se realizó por volumen, mediante el uso de recipientes graduados en litros.

- **Mezclado de los materiales.**

El mezclado se realizó con la hormigonera de tambor basculante de acción forzada mostrada en la figura 2.7, con el objetivo de facilitar el trabajo y proporcionar una mezcla más uniforme.



Figura 2.7: Hormigonera de tambor basculante

- **Carga de la máquina Vibracom**

Una vez terminado el mezclado de los materiales, el hormigón se vertió en el suelo cerca de la máquina, luego se inició la vibración y a la vez se realizó la carga del carro distribuidor con palas de manera secuenciada, velando siempre que no quedaran espacios vacíos en los moldes, para evitar la conformación de bloques incompletos.

- **Operación de desmoldeado**

Después de logrado el acomodo y compactación por vibrado de la mezcla dentro de los moldes con la ayuda del carro alimentador, se procedió a la extracción de los bloques. Para ello se requiere de un movimiento firme, y de una sola vez, de la palanca principal, quedando así los bloques sobre el pallet. Luego se desplazó hacia afuera el conjunto de la parrilla con el pallet y los bloques.

- **Traslado de los bloques frescos al área de curado inicial**

Dos de los obreros tomaron el pallet con los bloques de la máquina y lo trasladaron con cuidado hasta el área de curado inicial que se encontraba techada y con sombra.

- **Almacenaje de los bloques**

A las 24 horas de haberse fabricado los lotes de bloques, las unidades tenían cierta resistencia que permitió retirarlos de los pallets y colocarlos en un lugar adecuado para su curado.

- **Curado**

El curado se llevó a cabo rociándole agua con un cubo a cada uno de los bloques cada 24 horas por un período de 4 días.

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

Para la realización de los ensayos a los bloques según lo establece la NC 247-2010 primeramente se seleccionaron tres muestras aleatorias, una para cada uno de los tres lotes fabricados y el número de bloques por muestra fue de 10, luego se realizaron los ensayos de dimensiones, de resistencia y de absorción.

Tabla 2.12: Cantidad de bloques a ensayar por series

Dimensiones	Tamaño de la muestra			
	Resistencia a media a compresión	Absorción	Muestra adicional	Total
6	6	3	1	10

Fuente: Tabla 4 de la NC 247-2010

2.8.1 Ensayo de dimensiones

En el ensayo para verificar las dimensiones se hacen la cantidad de mediciones a los bloques que se muestran en la Tabla 2.14 según lo establece la norma, se promedian los resultados y estos deben adaptarse preferentemente en sus dimensiones nominales y de fabricación. Las dimensiones que deben tener los bloques según la NC 247-2010 son las siguientes:

Tabla 2.13: Dimensiones principales y tolerancias admisibles de los bloques tipo III.

Dimensiones	Nominales(mm)	Fabricación(mm)
Ancho	100	95 ± 3mm
Altura	200	195 ± 3mm
Longitud	400	395 ± 3mm

Fuente: Tabla 1 de la NC 247-2010

El espesor efectivo de las paredes exteriores y tabiques de los bloques no podrá ser inferior a 20 mm en ningún punto de los mismos, incluso en las paredes cizalladas.

Tabla 2.14: Mediciones que se le hacen a cada bloque

Dimensiones.	Procedimiento de medición.
Longitud	4 mediciones en las cabezas.
Ancho	6 mediciones, 3 puntos por la cara superior y 3 puntos por la cara inferior.
Altura	6 mediciones en 3 puntos en cada lateral.
Grosor de las paredes en la parte superior y en la base del bloque.	Se harán las mediciones en los puntos medios de cada tramo de pared correspondiente a un hueco para ambos lados en la parte superior o en la base del bloque según sea el caso.

Fuente: Tabla 5 de la NC 247-2010

Los resultados obtenidos en cada una de las mediciones para las tres series se pueden observar en el Anexo 2.

2.8.2 Ensayo de resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión se efectuó a los 7 y a los 28 días. Para realizar este ensayo se empleó una máquina para ensayo a la compresión con capacidad de 1500 kN.

Primeramente se coloca una capa de pasta constituida por mortero de cemento gris P- 35 sobre la superficie de carga y apoyo de los bloques con el fin de nivelarlas. A las 24 horas se procedió a ensayar cada bloque, para ello se colocó suavemente un bloque sobre el plato inferior de la máquina y sobre un área previamente determinada con un centro geométrico conocido que coincidía con el eje de carga de la máquina, luego se puso en contacto la superficie de la cara superior de la prensa con la cara superior del bloque y se comenzó a aplicar la carga a velocidad constante hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura.

El lote se considera conforme cuando el valor medio de la resistencia a la compresión sea mayor o igual al que se establece en la tabla 2 de la NC 247-2010 para cada tipo de bloque, siempre que el coeficiente de variación sea menor o igual a 0,20.



Figura 2.8: Recape de los bloques



Figura 2.9: Ensayo de resistencia a la compresión

2.8.3 Ensayo de absorción

El ensayo de absorción se realiza con el objetivo de determinar la capacidad de los bloques para absorber una determinada cantidad de agua. Este ensayo se realizó a los 28 días de haber fabricado los bloques. Para ello se empleó una balanza técnica de 20kg con una precisión de 20g y una estufa de regulación automática.

Primeramente se colocaron los bloques en la estufa a una temperatura de 105°C ~ 110°C para secarlos hasta que estuvieran en masa constante para obtener la masa seca. Una vez concluido este proceso se colocaron los bloques dentro de un estanque lleno de agua por un

período de 24 horas. Después de cumplido el tiempo se extrajeron los bloques, se eliminó el agua superficial y se pesaron en la balanza, determinándose así la masa húmeda. El lote se considera conforme cuando el promedio de las unidades de la muestra cumpla con la absorción establecida en la Tabla 2 de la NC 247-2010.



Figura 2.10: Estufa de regulación automática



Figura 2.11: Balanza de 20kg

2.9 Fabricación de las probetas de hormigón de 20 MPa

La fabricación de las probetas se llevó a cabo en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Santa Clara.

Se fabricaron 12 probetas, 6 con el cemento LC3 de Santa Clara (Serie SC) y 6 con el de Manicaragua (Serie M). La dosificación usada para la elaboración del hormigón de 20 MPa es la que se especifica en el Instructivo Técnico para el uso del Cemento de Bajo Carbono SIG B45. El diseño de la mezcla de hormigón se hizo para 40 litros, que es el volumen aproximado de 6 probetas de forma cilíndrica de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura (Tabla 2.15).

El asentamiento obtenido después de elaborada la mezcla en la hormigonera fue de 13 cm para el hormigón producido con el cemento LC3 de Manicaragua y 12 cm con el de Santa Clara, cumpliendo satisfactoriamente con el Asentamiento de Proyecto de ± 12 cm.

Tabla 2.15: Dosificación usada en la fabricación de las probetas de hormigón

Hormigón de 20 Mpa		
Materiales	Dosificación gravimétrica (kg/m ³)	Dosificación para 40 litros de hormigón (kg)
Cemento LC3	305	12.2
Arena de El Purio	592	23.7
Arena S. Soto.	254	10.16
Gravilla Palenque 19-10 mm	954	38.16
Agua	180	7.2
Aditivo Mapefluid N 100 RC	3.102	124 ml
R a/c Amasada	0.59	0.59
R a/c Efectiva	0.5	

Fuente: Elaborado por el autor

Para la confección de las probetas primeramente se cubrió la superficie interna del molde con una película delgada de aceite mineral, acto seguido se colocó el hormigón en el molde por capas de aproximadamente 10 cm de espesor, después de colocada cada capa estas se compactaron con una varilla provocándole 25 golpes y vibraciones con un martillo. Después de llenados los moldes se eliminó el hormigón ubicado sobre el borde superior de estos y se dejaron reposar por un día. Transcurridas las 24 horas se retiraron las probetas de los moldes y se sumergieron en agua hasta el día antes del ensayo de rotura a compresión.



Figura 2.12: Medición del asentamiento



Figura 2.13: Llenado de los moldes



Figura 2.14: Curado de las probetas de hormigón

2.10 Conclusiones parciales

- Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la investigación, se concibió el diseño experimental fabricando dos cementos LC3 artesanales en condiciones diferentes y con ellos producir bloques huecos de hormigón y un hormigón de 20 MPa.
- Durante el proceso de obtención a pequeña escala de los cementos LC3 en talleres artesanales, se hace difícil lograr las proporciones exactas de la adición, ya que las dosificaciones de las materias primas se realizaron por volumen y estas presentan diferente granulometría.
- Las características de los cementos producidos a pequeña escala se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio y ensayos de campo evaluando parámetros como: finura, tiempos de fraguado, hidraulicidad y laborabilidad.
- Los áridos empleados para la elaboración de los bloques huecos de hormigón no satisfacen las especificaciones en cuanto al porcentaje que pasa el Tamiz 200 y al porcentaje de arcillas según lo establecido en la NC 251-2005 lo que puede afectar propiedades como la laborabilidad y resistencia en las mezclas de hormigón.
- A los bloques elaborados a partir de los cementos artesanales se les realizaron los ensayos de dimensiones, resistencia a compresión y absorción establecidos en la NC 247-2010, mientras que a al hormigón sólo se le determinó la resistencia a compresión según lo establece la NC 274-2009.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros físicos-mecánicos de los cementos LC3 artesanales y sus aplicaciones

3.1 Generalidades

En este capítulo se exponen y se hace un análisis de los resultados de los ensayos realizados a los dos cementos LC3 fabricados a pequeña escala. Además se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las pastas de cemento, los bloques huecos de hormigón y a las probetas de hormigón de 20 MPa conformadas por estos cementos de producción local.

3.2 Análisis de los resultados de los aglomerantes

3.2.1 Ensayo de Finura

El ensayo de finura con el método del tamizado se le realizó a los dos cementos LC3 artesanales y a una muestra patrón de cemento P-35. El proceso descrito en el capítulo anterior se repitió tres veces con cada uno de los cementos y se promediaron los resultados, que son los que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resultado del ensayo de finura con el método del tamizado

Tipo de cemento	% Retenido en el Tamiz de 90 μm
Cemento LC3 de Santa Clara	8.5
Cemento LC3 de Manicaragua	6.5
Cemento P-35	6

Fuente: Elaborado por el autor

Como se puede observar en la Figura 3.1 tanto la muestra patrón de cemento P-35 como los cementos LC3 artesanales cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001, ya que en todos los casos el % Retenido en el Tamiz de 90 μm es menor que el 10%. Al comparar los cementos de producción local se puede ver como hay mayor finura en el cemento LC3 de Manicaragua, lo que se debe en gran medida al efecto de sobremolienda que se logra en el mezclado de la adición puzolánica con el cemento P-35 para su conformación.

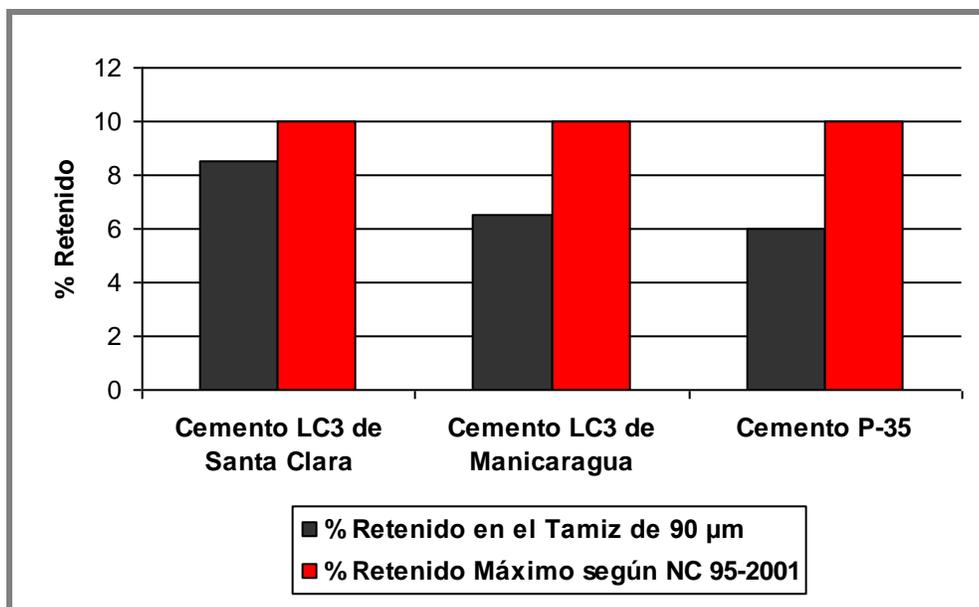


Figura 3.1: Gráfico del comportamiento de la finura para cada cemento

3.2.2 Ensayos de Sedimentación

Este ensayo se le realizó a los cementos LC3 artesanales y a una muestra de cemento P-35 para tenerlo como referencia. Para obtener los tiempos t1, t2 y t3 el proceso descrito en el capítulo anterior se repitió tres veces para cada uno de los cementos y se promediaron los tiempos, los resultados se muestran en la continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultado del ensayo de sedimentación

Tiempos (minuto)	Cemento LC3 Santa Clara	Cemento LC3 Manicaragua	Cemento P-35
t1	1:01	1:40	0:46
t2	1:58	3:41	1:24
t3	2:18	5:45	1:38

Fuente: Elaborado por el autor

Según los tiempos obtenidos para cada uno de los cementos se puede observar como los cementos LC3 poseen menor velocidad de asentamiento de las partículas en agua que el cemento P-35, debido en gran medida al aporte de las arcillas calcinadas a la superficie específica. De los dos cementos artesanales el cemento LC3 de Manicaragua es el de menor velocidad de asentamiento, lo que evidencia mayor finura.

Como se puede apreciar para los tres cementos los tiempos t1 son menores que 3 minutos y los t2 son menores que 5 minutos, por lo que según el “Manual de calidad para el cemento de bajo carbono LC3” no cumplen los requisitos de finura.

3.2.3 Ensayo Visual- Táctil

En la comparación del cemento LC3 de Santa Clara con el cemento P-35, al palpar ambas muestras con las manos, no existen grandes diferencias en la finura entre un cemento y otro, pero en el cemento LC3 se percibe la presencia de algunas partículas gruesas, que al observarlas se comprueba que estas provienen de la piedra caliza.

Con el cemento LC3 de Manicaragua al palpar ambas muestras con las manos, no existen diferencias en la finura entre un cemento y otro y ambos son imperceptibles al tacto, lo que presupone una buena finura

3.2.4 Ensayo de la Huella

Este ensayo se le realizó a los dos cementos LC3 artesanales y a una muestra de cemento P-35. Se midieron tres veces cada una hora para cada cemento los diámetros de la huella originados por la bola de acero por un período de 9 horas y luego a las 20 horas, se promediaron los diámetros y se obtuvieron los resultados que se muestran en el Anexo I.

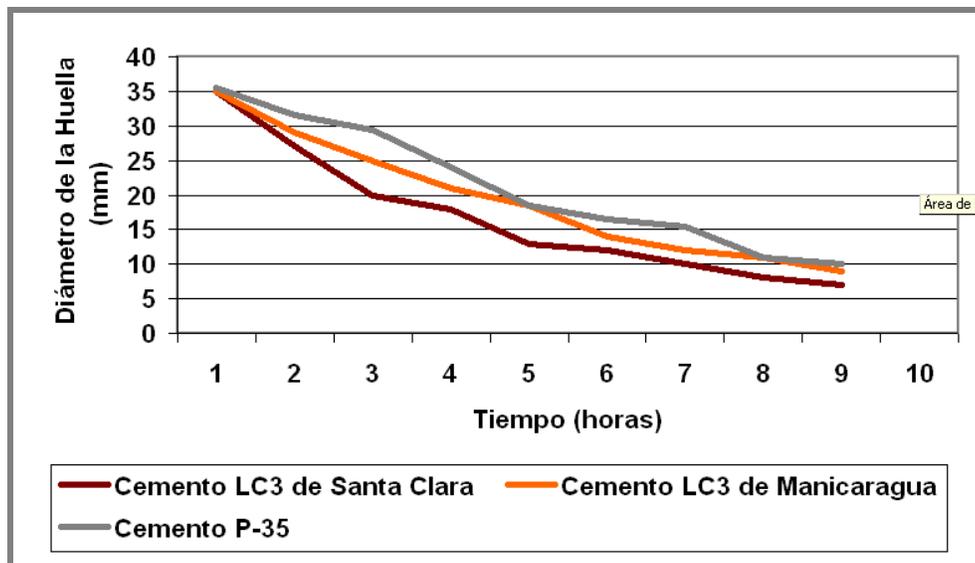


Figura 3.2: Gráfico del comportamiento del fraguado en las 9 primeras horas

Como se aprecia en la Figura 3.2 el comportamiento del fraguado de los cementos LC3 artesanales en la primera hora es muy similar al del cemento P-35. De los dos cementos de

producción local el de más lento fraguado es el LC3 de Manicaragua y es el que más se asemeja en las últimas dos horas al comportamiento del cemento P-35.

Después de calcular la Diferencia entre las huellas a las 5 y 20 horas como se especifica en el manual se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 3.3.

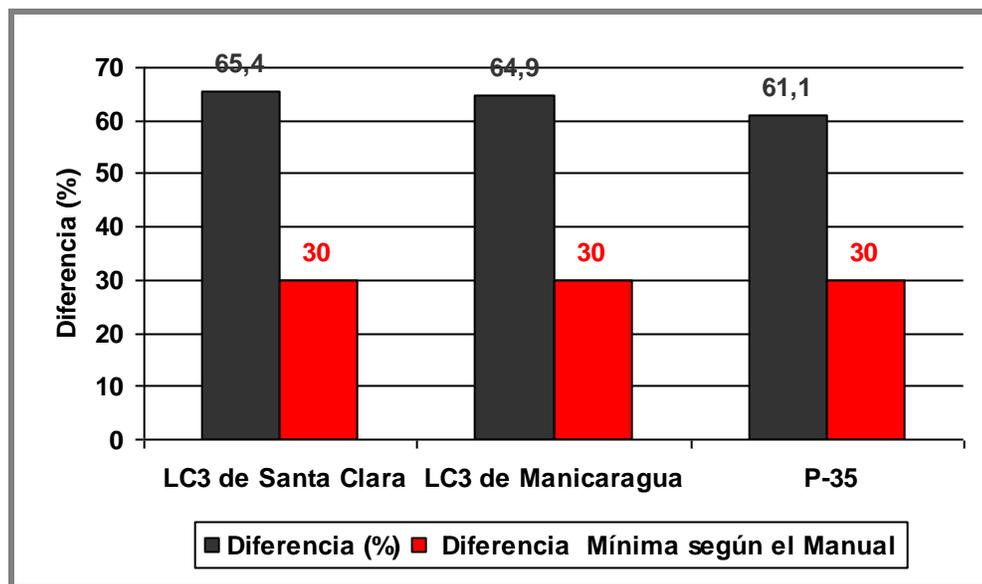


Figura 3.3: Gráfico del comportamiento del fraguado para cada cemento

Como se puede observar los dos cementos artesanales cumplen los requisitos de velocidad de fraguado según el manual de calidad, al igual que la muestra patrón ya que la diferencia calculada es mayor que el 30% para los tres casos.

3.2.5 Ensayo de Hidraulicidad

Tanto en el cemento LC3 de Santa Clara como en el de Manicaragua al evaluar la dureza de las bolas echas con la pasta de cemento después de estar sumergidas 24 horas en agua, se pudo comprobar que estas presentaban elevada dureza, por lo que se puede llegar a la conclusión de que las pastas de cemento presentan un buen carácter hidráulico.

3.2.6 Ensayo del Minicono

El ensayo del Minicono forma parte de los ensayos para obtener las propiedades reológicas en las pastas de cemento con el objetivo principal de determinar su laborabilidad. Este ensayo se le realizó a las muestras de cemento LC3 de Santa Clara y Manicaragua tomando como patrón de referencia el cemento P-35. El ensayo se repitió tres veces para cada una de las muestras, se promediaron los diámetros de las pastillas de cemento y se

obtuvieron las áreas de cada una. Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

Tabla 3.3: Resultado del ensayo del Minicono

Muestras	Áreas (cm ²)	Área promedio
Cemento P-35	27.1	26.7
	22.5	
	30.4	
Cemento LC3 de Santa Clara	17.7	19.2
	20.9	
	19.1	
Cemento LC3 de Manicaragua	16.2	16.4
	16.8	
	16.3	

Fuente: Elaborado por el autor

Como se puede observar tanto el cemento LC3 de Santa Clara como el de Manicaragua requieren de mayor cantidad de agua para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad que el cemento P-35, dado que el área de extensión de las pastas de cemento al quitar el Minicono de ambos cementos es menor que la obtenida con la muestra patrón, esto se debe a la gran cantidad de arcilla existente en sus composiciones, que es finamente molida por su baja dureza, logrando que estos cemento posean una mayor superficie específica y mayor demanda de agua. El cemento LC3 de Manicaragua necesita mayor cantidad de agua para lograr que la pasta sea laborable en comparación con el cemento de Santa Clara, lo que puede estar condicionado por la diferencia de finura que existe entre ellos.

3.3 Análisis de los resultados de los bloques huecos de hormigón.

3.3.1 Ensayo de dimensiones

El ensayo de dimensiones se le realizó a 6 bloques de cada una de las 3 series fabricadas, a los cuales se les verificó su longitud, altura, ancho y el espesor de las paredes. Los resultados de cada una de las mediciones se pueden observar en el Anexo 2. Las mediciones promedio del lote de bloques incluyendo las tres series son las que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultado del ensayo de dimensiones del lote de bloques fabricados

Dimensiones	Dimensiones promedio del lote (mm)	Dimensiones de fabricación especificadas en la NC 247-2010
Longitud	403.7	395 ± 3mm
Altura	183.8	195 ± 3mm
Ancho	104.6	95 ± 3mm
Espesor	32.2	>20mm

Fuente: Elaborado por el autor

Como se observa los bloques de hormigón cumplen con el espesor mínimo de las paredes y tabiques, pero no cumplen con las dimensiones de fabricación especificadas en la norma para bloques tipo III, en cuanto a su longitud, altura y ancho. Lo que se debe a la inexactitud de las dimensiones de los moldes de la maquina vibrocompactadora para fabricar bloques, perteneciente al Taller de Mantenimiento Constructivo de Manicaragua.

3.3.2 Ensayo de resistencia a compresión a los bloques huecos de hormigón.

Se ensayaron 3 bloques huecos de hormigón para cada una de las tres series fabricadas a los 7 a los 28 días y para los cálculos se utilizaron las siguientes expresiones según se especifica en la NC 247-2010:

$$R_i = \frac{F_j}{a_j} \text{ (MPa)}$$

R_i resistencia a la compresión de cada bloque (MPa).

F_j carga de rotura.

a_j área de la sección bruta del bloque.

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \text{ (MPa)}$$

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.

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

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).

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión obtenidos a los 7 y 28 días son los que se muestran a continuación en la Tabla 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5: Resistencia a compresión de los bloques a los 7 días

Bloques	R'i (Mpa)	R'm (Mpa)	SR' (Mpa)	V (%)
M-1	3.4	3.3	0.17	0.05
M-2	3.2			
M-3	3.4			
SC-1	3.6	3.0	0.45	0.15
SC-1	3.0			
SC-3	2.5			
L-1	2.0	1.8	0.17	0.1
L-2	1.9			
L-3	1.6			

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 3.6: Resistencia a compresión de los bloques a los 28 días

Bloques	R'i (Mpa)	R'm (Mpa)	SR' (Mpa)	V (%)
M-4	5.2	5.2	0.13	0.025
M-5	5.3			
M-6	5.0			
SC-4	5.4	5.3	0.19	0.036
SC-5	5.2			
SC-6	5.0			
L-4	2.7	2.7	0.13	0.05
L-5	2.5			
L-6	2.8			

Fuente: Elaborado por el autor

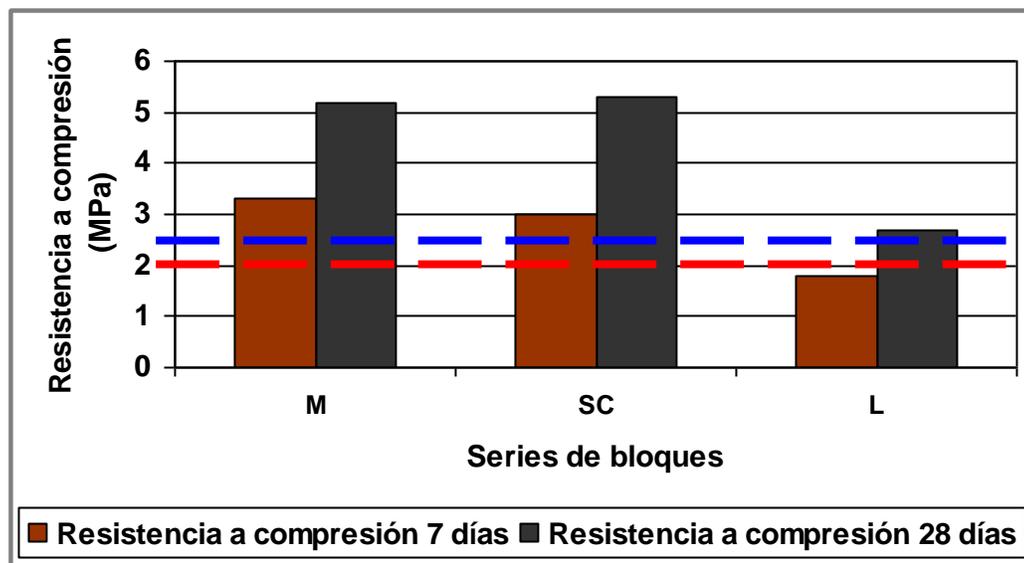


Figura 3.4: Gráfico del comportamiento de la resistencia a compresión de los bloques

En la Figura 3.4 se puede ver, como en el ensayo de resistencia a compresión a los 7 días, de las tres series de bloques ensayadas solo la serie L no cumplió con la resistencia mínima de 2 MPa (línea roja) establecida en la NC 247: 2010 para bloques tipo III, sin embargo en el ensayo a los 28 días tanto esta como las serie M y SC cumplieron satisfactoriamente con el valor mínimo de resistencia a la compresión de 2,5 MPa (línea azul). La diferencia que existe en la resistencia de la serie L en comparación con las series M y SC viene dada por el poco contenido de cemento que esta presenta en su dosificación.

3.3.3 Ensayo de absorción a los bloques huecos de hormigón

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se le realizó a 3 bloques de cada una de las tres series fabricadas. Este ensayo se realizó a la edad de 28 días y se utilizaron las siguientes expresiones:

$$A_i = \frac{M_{hi} - M_{si}}{M_{si}} \times 100$$

A_i absorción de la muestra (%)

M_{hi} masa húmeda de cada unidad de la muestra (kg)

M_{si} masa seca de cada unidad de la muestra (kg)

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

A_i absorción de cada unidad de la muestra de ensayo (%)

A_m absorción promedio (%)

n número de bloques de la muestra de ensayo

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_m)^2}{n}} \text{ (%)}$$

A_m absorción promedio (%).

A_i absorción relativa de cada muestra de ensayo (%).

n número de porciones de la muestra de ensayo.

Como se puede apreciar en la Tabla 3.7 todas las muestra ensayada cumplen con el porcentaje de absorción máximo establecido en la NC 247: 2010, la cual indica que para los bloques tipo III debe ser menor que 10%.

Tabla 3.7: Resultados del ensayo de absorción

Bloques	Msi (kg)	Mhi (kg)	Ai (%)	Am (%)	Sa (%)
M-1	13.24	13.92	5.1	5.0	0.06
M-2	13.46	14.14	5.0		
M-3	13.72	14.41	5.0		
SC-1	12.39	12.90	4.1	4.2	0.1
SC-2	12.58	13.10	4.1		
SC-3	12.47	13.00	4.3		
L-1	10.23	10.87	6.3	6.3	0.13
L-2	10.40	11.04	6.1		
L-3	10.11	10.76	6.4		

Fuente: Elaborado por el autor

3.4 Análisis de los resultados del ensayo de compresión al hormigón de 20 MPa

El ensayo de resistencia a compresión se efectuó a los 7 y a los 28 días. Para su realización se empleó una máquina para ensayo a la compresión con capacidad de 1500 kN.



Figura 3.4: Ensayo de resistencia a la compresión a las probetas de hormigón

La resistencia a la compresión de cada una de las probetas ensayadas (f_{ci}) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{ci} = \frac{F}{A} 10 \text{ (Mpa)}$$

F: Carga de rotura (KN).

A: Área de la sección transversal de la probeta (cm²).

La resistencia a la compresión de la serie de probetas (f_{cs}) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \text{ (Mpa)}$$

n tamaño de la muestra de ensayo.

Los resultados de resistencia a compresión obtenidos a los 7 días son los que se muestran a continuación en las tablas 3.8.

Tabla 3.8: Resistencia a compresión del hormigón a los 7 días

Probetas	fci (MPa)	fcs (MPa)	Desviación típica
M-1	8.5	9.2	0.57
M-2	9.9		
M-3	9.2		
SC-1	12.9	12.6	0.25
SC-2	12.3		
SC-3	12.7		

Fuente: Elaborado por el autor

Como se observa en la Tabla 3.8 los hormigones elaborados con los cementos LC3 de producción local, poseen bajos valores de resistencia a la edad de 7 días. Lo que puede estar provocado por los altos contenidos de adición presentes en la composición de estos aglomerantes, donde se reduce el contenido de clínquer hasta un 44%, causando bajos índices de resistencia, principalmente a edades tempranas.

3.5 Conclusiones parciales

- Los cementos LC3 fabricados a pequeña escala cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001, ya que en ambos el % Retenido en el Tamiz de 90µm es menor que el 10%.
- Los dos cementos artesanales cumplen los requisitos de velocidad de fraguado según el “Manual de calidad del cemento de bajo carbono LC3”, siendo su comportamiento hasta la primera hora muy similar al fraguado del cemento P-35, pero a partir de ahí el fraguado de los dos cementos LC3 se comporta más rápido.
- La demanda de agua para lograr la laborabilidad requerida en las mezclas usando los cementos LC3 de Santa Clara y LC3 de Manicaragua es mayor en comparación con el cemento P-35, ya que estos poseen mayor superficie específica causada por los grandes porcentos de arcilla presente en su composición.
- Los bloques huecos de hormigón tipo III fabricados con los cementos LC3, usando la dosificación especificada en el Instructivo Técnico para el uso del cemento de bajo carbono, cumplen con las resistencias mínimas a los 7 y 28 días y con el porcentaje de absorción máximo especificado en la NC 247-2010.
- Las probetas de hormigón elaboradas con los cementos LC3 de producción local, presentaron bajos índices de resistencia a la compresión a los 7 días.

CONCLUSIONES GENERALES

- Los cementos LC3 fabricados a pequeña escala, fueron obtenidos usando diferentes equipos de molturación y ambos cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001.
- Según los resultados obtenidos con los ensayos de campo especificados en el “Manual de calidad del cemento de bajo carbono LC3” los cementos artesanales cumplen los requisitos de velocidad de fraguado y presentan un buen carácter hidráulico.
- Los cementos LC3 artesanales requieren de mayor cantidad de agua para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad que el cemento P-35.
- La utilización de cementos LC3 de producción local en la fabricación de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción alcanzada, constituyendo así una viable alternativa para nuestro país.
- El hormigón elaborado con los cementos LC3 de producción local, empleando la dosificación presentada en el Instructivo Técnico para el uso del Cemento de Bajo Carbono, presenta bajos índices de resistencia a la compresión a los 7 días.

RECOMENDACIONES

- Efectuar los ensayos de actividad puzolánica y calorimetría isotérmica a la adición puzolánica obtenida a partir de un 60% de polvo de ladrillo o rasilla y un 40% de caliza, para evaluar el comportamiento de las reacciones puzolánicas.
- Utilizar una dosificación gravimétrica en la fabricación de los cementos artesanales, donde se pesen cada una de las materias primas, para lograr que su composición final sea lo más exacta posible.
- Realizar a los cementos LC3 artesanales los ensayos de laboratorio para obtener su caracterización según lo establece la NC 96-2011 para cementos con adición activa.
- Corregir en el “Manual de Calidad del cemento de bajo carbono LC3” los tiempos mínimos de asentamiento de las partículas de cemento en agua, especificados en el ensayo de sedimentación.
- Darle seguimiento a las probetas de hormigón y realizarle el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días, para comprobar que cumplen con la resistencia especificada de 20 MPa.

BIBLIOGRAFÍA

Aguiar Pérez, A., 2014. “Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono”. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.

Agency, E., 2013. *International energy outlook*

Alujas, . A., 2010. “Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente.” Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Alvarez Alonso , . M., 1990. *Bloques de hormigón, análisis de la normativa UNE, ISO, en comparación con otras normas internacionales.* Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

Ambroise, J. & Pera, J., 1994. Properties of Metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials.*

Anónimo, 2015. Aglomerantes. *Materialestecnicosabasella.* Disponible en: <http://materialestecnicosabasella.wikispaces.com>

Arbesú, C., 2007. Código de Buena Práctica para la ejecución de fábricas con bloques y mampostería de hormigón. *NORMABLOC.* Madrid, España.

Arrieta, F. & Peña, J., 2001. *Fabricación de bloques de concreto con una mesa vibratoria,* Programa Científico PC – CISMID, Perú.

Artega , J. C., 2009. Comportamiento mecánico y caracterización de morteros elaborados con cemento portland ultrafinos.

ASTM C-595 Standard Specifications for Blended Hydraulic Cements. Especificaciones estándar para cementos hidráulicos mezclados. United State.

ASTM C-618 Standard Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United State.

ASTM-C: 150-00 2000. Standard Specification for Portland Cement. United State.

Betancourt Rodríguez, S., 1997. “Estudio teórico experimental de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña.” Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

- Blanco, . M., 2009. Characterization and pozzolanicity of zeolitic rocks from two Cuban deposits. *Applied Clay Science*.
- Brito , . M. & Rivera, D., 2005. *Análisis de los factores influyentes en el proceso de elaboración de bloques*.
- Castillo, R., 2010. "Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza". Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Cembureau & Oficemen, 2012. *La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera*.
- Cembureau, 2011. *Activity report*. Disponible en: www.cembureau.eu
- Cembureau, 2012. Strategic Contributor to Europe's Future. *The European Cement Association*.
- CIDEM, 2011. *Manual Instructivo para la producción de bloques huecos de hormigón con la maquina Vibracom*.
- CIDEM, 2013. *Instructivo Técnico para el uso del Cemento de Bajo Carbono SIG B45*.
- CIDEM, 2015. *Manual de calidad del Cemento de bajo carbono LC3*.
- CSI, 2010. *Cement Industry Energy and CO2 Performance. Getting the Numbers Right*. Disponible en : www.wbcscement.org.
- Dopico, J. & Martirena, F., 2008. *Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario*.
- Eloy, D., 2014. *Tecnología y fabricación de ladrillos en la UEB Sergio Soto*. UEB Escuela de capacitación, MICONS, Villa Clara.
- Fernández, L., 2013. "Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínker a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales". Tesis de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" De Las Villas.
- Flatt, . R., 2012. *Concrete: An eco material that needs to be improved*. Journal of the European Ceramic Society.

- Gordillo, T., s.f. *Bloques de hormigón., Foyeto Técnico*, España.
- Habert, . G., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*.
- Herrera, J. J., 2008. “*El taller de ecomateriales*”. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.
- Lawrence, . P., 2005. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research*.
- López, . E., 2014. “*Evaluación energético ambiental de la producción de cemento portland ordinario con la adición de arcillas activadas térmicamente*”. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.
- Lothenbach, B., 2008. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*.
- Martirena, 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”. Tesis en opción del grado de Doctor en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas.
- Martirena, . F., 2011. *Reporte sobre Estudio de factibilidad para la producción de metakaolín en Cuba*, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.
- Martirena, F., 2015. *La producción local del cemento de bajo carbono LC3*. Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Massazza, F., 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*.
- Matschei, T., Lothenbach, B. & Glasser, F., 2007. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*.
- Megat, J., 2011. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*.
- Morales, G., 2010. *Influencia del empleo de sulfato de sodio como activador químico en morteros de cemento con adiciones cal-puzolana*. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.

Nair , D., 2008. A structural investigation relating to the pozzolamic activity of rice husk ashes. *Cement and Concrete Research*.

Nazco, K., 2014. *Evaluación de arcillas multicomponentes cubanas como fuente de materia prima para la producción de materiales cementicios suplementarios*. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. NC 192-2007 *Hormigón hidráulico-Cálculo de la resistencia características real a la compresión*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2012. NC 235-2012 *Pastas de cemento-Determinación de la plasticidad y su variación en el tiempo por el método del minicono*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2010. NC 247-2010 *Bloques huecos de hormigón-Especificaciones*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. NC 250: 2007 *Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. NC 507-2007 *Cemento Hidráulico. Método de ensayo. Análisis químico*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. NC 523-2007 *Cemento Hidráulico-Método de ensayo- Determinación de la densidad*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. NC 524-2007 *Cemento Hidráulico-Método de ensayo- Determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado por aguja Vicat*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2001. NC 95-2001 *Cemento Portland-Especificaciones*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2011. NC 95-2011 *Cemento Portland-Especificaciones*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2011. NC 96-2011 *Cemento con adición activa-Especificaciones*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2010. *NC ISO 1920-3: 2010 Ensayos al Hormigón- Parte 3: Elaboración y curado de probetas para ensayos*. Ciudad de La Habana, Cuba.

OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN 2007. *NC-EN 196-6: 2007 Cemento Hidráulico- Método de ensayo- Determinación de la finura y la superficie específica*. Ciudad de La Habana, Cuba.

Pane, . I. & Hansen, W., 2005. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*.

Pérez Nagore , G. & Elorza Uria, . E., .*Cemento*.

Pierre & Claude, A., 2000. Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*.

Quadra, 2015. Máquina ultramoderna de producción de bloques puesta en funcionamiento en Corblock en Argentina. *Planta de hormigón internacional. Productos y losas de hormigón*.

Rodríguez , C. M., 2013. *Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de albañilería a partir de cementos con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza*, Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.

Rossen, J., 2010. *Ternary Cementblends base don metakaolin and limestone*, Master, EPFL.

Salas, A., 2009. Comparison of two process for treating rice husk ash for use in high performance concrete. *Cement and Concrete Research*.

Sha, W. & Pereira, G., 2001. Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolin and theoretical approach of metakaolin activity. *Cement and Concrete Composites*.

Taylor, M., 2006. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry in Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry. *Energy Technology Policy Division*.

Turanli , L., 2004. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans,. *Cement and Concrete Research*.

Vizcaíno , . L. . M., 2014. Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer- arcilla calcinada- caliza. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

WBCD -CSI, 2012. *Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Emissions Monitoring and Reporting 2012. Disponible en: www.wbcdcement.org*

Zerquera, I. V., 2013. En la forja del cemento ecológico. *Periodico Vanguardia*, Villa Clara, Cuba, 19 mayo.

ANEXOS

Anexo 1: Resultado del ensayo de la huella para los cementos LC3 artesanales y el cemento P-35

Tabla A.1: Resultado del ensayo de la huella

Tiempo (horas)	Diámetro de la huella (mm)		
	Cemento LC3 de Santa Clara	Cemento LC3 de Manicaragua	Cemento P-35
1	35	35	35.5
2	27	29	31.5
3	20	25	29.5
4	18	21	24
5	13	18.5	18.5
6	12	14	16.5
7	10	12	15.5
8	8	11	11
9	7	9	10
20	4.5	6.5	7

Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 2: Resultados del ensayo de dimensiones de los bloques

La dimensión promedio (X) y su desviación (Sx) se calculan por medio de las siguientes expresiones:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n xi}{n} \text{ (mm)} \quad Sx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xi - X)^2}{n}} \text{ (mm)}$$

Donde:

X dimensión promedio de la muestra (mm)

Xi dimensión de cada bloque (mm)

Sx desviación típica de las dimensiones de la muestra

n tamaño de la muestra (número de bloques que constituyen la muestra)

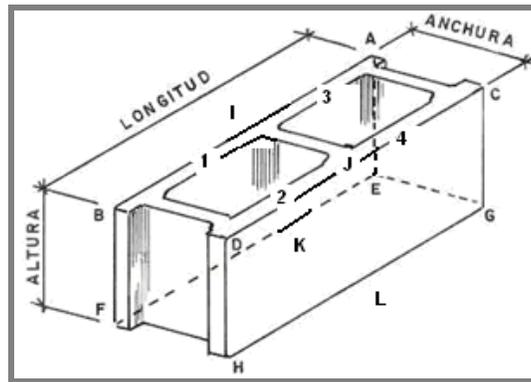


Figura A.2: Mediciones realizadas a los bloques

Tabla A.2.1: Mediciones de la longitud de los bloques

Bloques	Longitud (mm)				Promedio (mm)	Cumple la NC 247-2010	Desviación típica(mm)
	A-B	C-D	E-F	G-H			
I-1	405	404	406	405	405	No	0.91
I-2	406	405	407	406	406	No	
I-3	404	405	404	403	404	No	
I-4	408	404	404	404	405	No	
I-5	403	403	404	404	403.5	No	
I-6	404	402	404	404	403.5	No	
Promedio x(mm)					404.5	No	
II-1	404	404	406	406	405	No	2.4
II-2	404	405	404	403	404	No	
II-3	405	406	406	407	406	No	
II-4	401	401	400	402	401	No	
II-5	400	401	391	404	399	No	
II-6	401	402	403	402	402	No	
Promedio x(mm)					402.8	No	
III-1	404	404	404	404	404	No	1.47
III-2	406	406	405	405	405	No	
III-3	405	404	405	406	405	No	
III-4	405	406	402	406	404.75	No	
III-5	402	404	402	402	402.5	No	
III-6	402	401	400	401	401	No	
Promedio x(mm)					403.7	No	

Tabla A.2.2: Mediciones de la altura de los bloques

Bloques	Altura(mm)						Promedio (mm)	Cumple la NC 247-2010	Desviación típica Sx(mm)
	B-F	I-K	A-E	C-G	J-L	D-H			
I-1	190	191	192	191	191	191	191	No	7.1
I-2	186	187	188	188	187	186	187	No	
I-3	190	189	191	190	189	191	190	No	
I-4	173	171	168	170	171	172	170.8	No	
I-5	178	178	173	181	180	180	178.3	No	
I-6	182	181	178	185	184	188	183	No	
Promedio x(mm)							183.4	No	
II-1	190	189	191	191	189	190	190	No	3.5
II-2	187	186	185	187	186	185	186	No	
II-3	187	188	189	187	188	189	188	No	
II-4	175	180	181	180	179	171	177.6	No	
II-5	179	184	185	180	183	169	180	No	
II-6	177	178	181	178	177	180	178.5	No	
Promedio x(mm)							183.4	No	
III-1	190	188	189	189	188	190	189	No	4.9
III-2	186	187	188	188	187	186	187	No	
III-3	189	189	188	189	190	189	189	No	
III-4	177	187	182	176	180	186	181.3	No	
III-5	174	175	182	175	180	178	177.3	No	
III-6	187	190	182	180	182	181	183.6	No	
Promedio x(mm)							184.5	No	

Tabla A.2.3: Mediciones del ancho de los bloques

Bloques	Ancho(mm)						Promedio (mm)	Cumple la NC 247-2010	Desviación típica Sx(mm)
	B-D	I-J	A-C	F-H	K-L	E-G			
I-1	104	105	105	105	105	106	105	No	0.48
I-2	105	105	106	105	104	105	105	No	
I-3	106	106	107	106	105	106	106	No	
I-4	104	105	107	107	107	106	106	No	
I-5	104	105	105	106	107	104	105.2	No	
I-6	105	104	103	106	107	104	104.8	No	
Promedio x(mm)							105.3	No	
II-1	107	106	105	106	106	106	106	No	1.57
II-2	106	104	105	106	104	105	105	No	
II-3	106	106	105	106	106	107	106	No	
II-4	101	102	103	102	102	103	102.2	No	
II-5	101	102	103	102	102	104	102.3	No	
II-6	103	108	103	102	105	103	104	No	
Promedio x(mm)							104.25	No	
III-1	106	105	104	106	105	104	105	No	
III-2	107	106	105	107	105	106	106	No	
III-3	104	104	105	103	104	104	104	No	

III-4	102	104	104	103	104	102	103.2	No	1.19
III-5	104	103	102	107	106	104	104.3	No	
III-6	102	103	102	101	102	104	102.3	No	
Promedio x(mm)							104.1	No	

Tabla A.2.4: Mediciones del espesor de las paredes de los bloques

Bloques	Espesor de las paredes (mm)				Promedio (mm)	Cumple la NC 247 -2010	Desviación típica(mm)
	A-B	C-D	E-F	G-H			
I-1	31	32	32	32	31.75	Si	0.87
I-2	32	31	33	34	32.5	Si	
I-3	33	32	34	34	33.25	Si	
I-4	30	31	33	34	32	Si	
I-5	31	32	35	36	33.5	Si	
I-6	32	30	38	37	34.25	Si	
Promedio x(mm)					32.9	Si	
II-1	32	28	33	39	33	Si	0.51
II-2	28	32	37	32	32.25	Si	
II-3	30	29	36	34	32.25	Si	
II-4	31	32	35	37	33.75	Si	
II-5	32	33	34	33	33	Si	
II-6	31	31	34	36	33	Si	
Promedio x(mm)					32.9	Si	
III-1	30	29	30	32	30.25	Si	0.58
III-2	33	29	29	30	30.25	Si	
III-3	28	29	31	33	30.25	Si	
III-4	30	29	32	31	30.5	Si	
III-5	29	31	32	33	31.25	Si	
III-6	30	31	32	34	31.75	Si	
Promedio x(mm)					30.7	Si	

Anexo 3: Molinos utilizados para la fabricación de los cementos LC3 artesanales



Figura A.3.1: Molino de bolas MB-800



Figura A.3.2: Molino de bolas CR 94

Anexo 4: Resultados del ensayo de resistencia a compresión de los cementos LC3 artesanales a los tres días

Tabla A.4.1: Resistencia a compresión de los cementos artesanales a los 3 días

Tipo de cemento	Resistencia a compresión a los 3 días (MPa)
LC3 Santa Clara	19.0
LC3 Manicaragua	14.4