

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Título del trabajo: Validación técnico – económica de la cadena de producción local del LC<sup>3</sup> en el municipio de Fomento

Autor del trabajo: Yadian León Sorrondegú

Tutor del trabajo: Dr. C. Ing. Iván Machado López

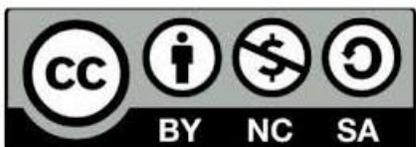
Santa Clara Junio, 2018  
Copyright©UCLV

---

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

---

## *Pensamiento*

*Tanta prisa tenemos por hacer, escribir y dejar oír nuestra voz en el silencio de la eternidad, que olvidamos lo único realmente importante: ¡VIVIR!*

Robert Louis Stevenson

---

## *Dedicatoria*

*A mis padres por ayudarme en todo momento a formarme como un verdadero ser humano. Me siento orgulloso de ellos y los amo.*

*A mi hermana porque con su inocencia está siempre ahí para mí y porque es el amor de mi vida.*

---

## *Agradecimiento*

*Gracias Dios por guiarme y mostrarme el camino.*

*Gracias papá por ser mi amigo, y vivir un día a la vez junto a mí, te quiero bro.*

*A mi madre porque con su delicadeza me llena de amor y confianza.*

*A mi enana por ser mi musa de inspiración.*

*A mi abuelo Papi que, aunque no está presente físicamente, me enseñó a enfrentar la vida de una manera diferente y ser la persona que soy hoy.*

*A mis abuelos que hoy gozo de ellos por darme todo su cariño, amor y confianza en todos los momentos de mi vida.*

*A toda mi familia por estar al pendiente en toda mi trayectoria como estudiante.*

*A mi tía Raquel, Pipí Luis, mi tata Níuris porque en su casa aprendí a dar mis primeros pasos.*

*Al cuartico verde, de Angelín quien ha sido más que un amigo, sino mi hermano que lucha día a día conmigo.*

*A mi prima Yadira por preocuparse de mí durante toda mi carrera.*

*A todos mis amigos por compartir momentos inolvidables.*

*A mis hermanos de causa, gracia a ellos pase los mejores 5 años de mi vida.*

*A toda la familia de mis compañeros de causa que estuvieron pendiente de durante toda la carrera.*

---

*A mi tutor por asesorarme en el transcurso de este Trabajo de diploma.*

*A David el del restaurante por aceptarme como su hijo.*

*A Marcial y su colectivo de trabajadores en Fomento por brindarme todo el apoyo en la realización de este proyecto.*

*A todas mis amistades de Veterinaria que tanto apoyo me brindaron.*

*A mis compañeros de estudio por formar parte de mi vida profesional.*

*Al colectivo de profesores de la Universidad por darme la preparación que hoy poseo.*

*A todo el piquete que estuvieron a mi lado en todas las etapas de mi vida en la universidad.*

*A todas las personas que de una forma u otra han contribuido a hacer realidad este sueño.*

*MUCHAS 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 cemento de bajo carbono LC<sup>3</sup>, para su posterior utilización en la fabricación de bloques huecos de hormigón de 10 cm de ancho, así como elementos prefabricados, además de un hormigón de hasta 20MPa. El aglomerante fabricado presenta un 50% de cemento P-35 más la adición de un 30% de Arcilla Activa Térmicamente (AAT) y un 20 % de caliza. La fabricación del cemento se realizó en el Taller de Mantenimiento de Agabama, municipio Fomento, donde se usaron equipos de moliendas, de mezclado y una máquina bloquera de vibro-compactación propia del taller. Al cemento LC<sup>3</sup> se le realizó el ensayo de finura mediante el método del tamizado, además de los ensayos de campo especificados en el Manual de Calidad de cemento de bajo carbono se evalúa en consecuencia, el índice actividad puzolánica, la finura, el fraguado y el carácter hidráulico de los mismo. Se obtienen además resultados a nivel de laboratorio para evaluar la idoneidad de los bloques huecos y de los hormigones de 20 MPa usualmente empleados en la producción local para la obtención de diferentes elementos de pequeño formato.

Palabras claves: arcilla calcinada, cemento, bloques, hormigones, mezclado, molienda.

---

---

## *ABSTRACT*

The current paper tests the combined adding of lime stone with calcined clay that is obtained from the grinding of red clay bricks when producing Lime Calcined Clay Cement (LC<sup>3</sup>) at a local scale. This cement is used for producing 10 cm hollowed concrete bricks, as well as pre-fabricated components and concrete up to 20MPa. This binding material obtained contains 50% of P-35 cement, the addition of 30% of thermally activated clay and 20% of limestone. The production of the cement was carried out at the Agabama maintenance workshop in Fomento municipality. To obtain the final outcome, there was used grinding and mixing machinery along with a block machine based on vibration and crushing. A Fineness test was also applied to this product using the sieve method and field trials on the area as indicated in the LC<sup>3</sup>Quality Book. This testing process takes into account the pozzolanic cement activity indicator, the fineness, the setting, and the hydraulic character of the cement. Moreover, Lab results were also obtained in order to calculate the appropriateness of the 20MPa concrete hollowed blocks commonly used for the local production to obtain different minor scale components.

Word key: calcined clay, cement, blocks, concrete, grinding, mixing



## Índice:

### Contenido

|  |    |
|--|----|
| Introducción .....   | 1  |
| CAPITULO I: Producción del cemento de bajo carbono (LC <sup>3</sup> ) en el municipio de Fomento, a partir de la utilización de desechos cerámicos. .... | 1  |
| 1.1 El Cemento portland (CPO). Generalidades.....  | 1  |
| 1.1.1 Tipos, usos, y características del cemento portland: .....   | 1  |
| Tipo 1 - Se trata de un cemento normal y se obtiene tras mezclar el clínker con el yeso. Se usa generalmente en las obras de ingeniería. ....            | 1  |
| 1.1.2 Características físicas de los cementos portland.....  | 2  |
| 1.1.3 Impactos en la reducción del factor de clínker:.....   | 5  |
| 1.2 Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).....   | 7  |
| 1.2.1 Las puzolanas como material de construcción .....  | 7  |
| 1.2.2 Actividad puzolánica: .....  | 8  |
| 1.2.3 Reacción puzolánica: .....   | 9  |
| 1.2.4 Cenizas volantes y fundidos granulados: .....  | 10 |
| 1.2.5 Las Arcillas.....  | 10 |
| 1.2.5.1 Estructura y composición de las arcillas. ....   | 11 |
| 1.3 Arcillas calcinadas como material cementicios suplementario.....   | 11 |
| 1.3.1 Arcillas caoliníticas: metacaolín.....   | 12 |
| 1.4 El Sistema clínker-arcillas calcinadas -carbonato de calcio.....   | 13 |
| 1.5 Características de los principales yacimientos caoliniticos reportados en Cuba.....  | 14 |
| 1.6 Residuos de cerámica.....  | 15 |
| 1.6.1 Proceso de fabricación de productos cerámicos .....  | 15 |
| 1.6.2 Producción de ladrillos y otras cerámicas rojas.....   | 15 |
| 1.6.3 Polvo de ladrillo como puzolana:.....  | 16 |
| 1.7 Eficiencia de las arcillas calcinadas en pastas de cemento portland .....  | 16 |

|   |    |
|---|----|
| 1.7.1 Cementos ternarios con arcillas calcinadas.....   | 17 |
| 1.8 Cemento de bajo carbono (LC <sup>3</sup> ).....   | 18 |
| 1.8.1 Propiedades LC <sup>3</sup> .....   | 20 |
| 1.8.2 Producción local de cemento LC <sup>3</sup> .....   | 20 |
| 1.9 Características de elementos prefabricados en talleres de producción local.....   | 21 |
| 1.9.1 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.....  | 22 |
| 1.9.2 Otros elementos prefabricados en talleres de producción de pequeño formato .....  | 23 |
| 1.9.2.1 Características Técnicas de los elementos .....   | 25 |
| 1.10 Conclusiones parciales del capítulo .....  | 28 |
| Capítulo II: Fabricación del cemento de bajo carbono (LC3) en la escala de producción local, así como la obtención de elementos a partir de dicho cemento. .... | 29 |
| 2.1 Generalidades.....  | 29 |
| 2.2 Horno artesanal de Fomento.....   | 29 |
| 2.3 Yacimiento de arcilla en el municipio de Fomento. Sancti Spíritus.....  | 30 |
| 2.3.1 Geología. ....  | 32 |
| 2.3.2 Características tecnológicas.....   | 34 |
| 2.3.3 Hidrogeología del yacimiento. ....  | 35 |
| 2.4 Fabricación del cemento LC <sup>3</sup> en Fomento.....   | 35 |
| 2.5 Implementación de ensayos de campos. ....   | 37 |
| 2.5.1 Dosificación de bolas de Acero .....  | 37 |
| 2.5.2 Tiempo de molienda.....   | 37 |
| 2.5.3 Capacidad neta del molino y rendimiento.....  | 38 |
| 2.5.4 Consumo Energético.....   | 39 |
| 2.5 Ensayos de Campo.....   | 39 |
| 2.5.1 Sedimentación .....   | 39 |
| 2.5.2 Ensayo visual-táctil LC <sup>3</sup> .....  | 40 |
| 2.5.3 Ensayo de la Huella .....   | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 2.5.4 Hidraulicidad .....   | 41 |
| 2.5.5 Humedad natural en arcillas calcinadas .....  | 41 |
| 2.6 Ensayos de Laboratorio: .....   | 42 |
| 2.6.1 Reactividad de la arcilla original .....  | 42 |
| 2.6.2 Peso unitario de las materias primas.....   | 43 |
| 2.6.3 Granulometría .....   | 43 |
| 2.6.4 Finura de molido .....  | 44 |
| 2.6.5 Consistencia Normal .....   | 44 |
| 2.6.6 Tiempo de Fraguado.....   | 45 |
| 2.7 Proceso de fabricación de los morteros: .....   | 46 |
| 2.7.1 Resistencia a Compresión de las probetas .....  | 47 |
| 2.7.2 Resistencia Mecánica .....  | 48 |
| 2.8. Elementos prefabricados. Proceso de fabricación de los bloques huecos de hormigón  | 49 |
| 2.8.1 Descripción de los ensayos realizados a los bloques huecos de hormigón .....  | 51 |
| 2.8.2 Ensayo de dimensiones .....   | 52 |
| 2.8.3 Ensayo de resistencia a compresión .....  | 52 |
| 2.8.4 Ensayo de absorción.....  | 53 |
| 2.9. Vigas, plaquetas, losa de pisos y hexagonales de hormigón.....   | 54 |
| 2.9.1 Probetas de hormigón para 20 MPa.....   | 54 |
| 2.10 Conclusiones Parciales .....   | 55 |
| Capítulo III: Evaluación del comportamiento del cemento de bajo carbono producido, así como los elementos obtenidos en la localidad de Agabama, Fomento ..... | 57 |
| 3.1 Generalidades.....  | 57 |
| 3.2 Análisis de los resultados de los ensayos realizados en la producción local .....   | 57 |
| 3.2.1 Sedimentación .....   | 58 |
| 3.2.2 Ensayo visual-táctil .....  | 59 |
| 3.2.3 Ensayo de la huella.....  | 59 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.2.4 Hidraulicidad .....   | 60 |
| 3.2.5 Humedad natural en arcilla calcinada.....   | 60 |
| 3.2.6 Reactividad de la arcilla original .....  | 60 |
| 3.2.7 Peso unitario de las materias primas.....   | 61 |
| 3.2.8 Granulometría .....   | 62 |
| 3.2.9 Finura de molido .....  | 63 |
| 3.2.10 Consistencia normal y Tiempo de fraguado .....   | 64 |
| 3.3 Ensayo de los Morteros .....  | 65 |
| 3.4 Análisis de los resultados de los bloques huecos de hormigón .....  | 66 |
| 3.4.1 Ensayo de las dimensiones.....  | 66 |
| 3.4.2 Ensayo de la resistencia a compresión .....   | 67 |
| 3.4.3 Absorción de agua de los bloques huecos de hormigón.....  | 68 |
| 3.5 Análisis de los resultados del ensayo de compresión al hormigón de 20 MPa .....   | 69 |
| 3.7 Análisis técnico – económico del proceso de obtención del LC <sup>3</sup> y los elementos formados a partir de dicho cemento..... | 71 |
| 3.8 Conclusiones Parciales.....   | 72 |
| Conclusiones Generales .....  | 73 |
| Recomendaciones .....   | 74 |
| Bibliografía.....   | 75 |
| Anexos.....   | 78 |

### Introducción

El cemento es un conglomerante hidráulico; es un producto que mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en el aire, como bajo agua. El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Tiene como propiedad principal la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua(Díaz-Ponce, 2012).

La utilización de puzolanas como reemplazo parcial del cemento, contribuye a la disminución de la cantidad de clínker utilizado y de esta manera disminuye la emisión de CO<sub>2</sub>, mejorando, además, cuando se las utiliza en el porcentaje adecuado y poseen las características requeridas, la resistencia y durabilidad de los morteros realizados (Samet et al., 2007). Entre los materiales utilizados como puzolanas, se encuentran las arcillas activadas térmicamente, el rango de temperaturas para su activación (550 °C a 900 °C) es inferior a la temperatura de clinkerización (1450 °C), lo que implica un menor consumo de energía con la consecuente disminución en la emisión de CO<sub>2</sub>(Sabir et al., 2001).

El uso de arcillas calcinadas como material puzolánicos ha recibido considerable atención en años recientes. Este particular interés es debido a la expansión de estrategias de sustitución de clínker por materiales cementicios suplementarios (MCS) para minimizar el impacto medioambiental provocado por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento(Siddique and Klaus, 2009).

En la década del 60 la alta demanda de viviendas obligó al gobierno a invertir en sistemas que garantizaran una mayor productividad en la construcción; de esta forma entró a Cuba la prefabricación. Estos sistemas constructivos fueron concebidos principalmente para garantizar una alta productividad, que se lograba a costa de altos consumos de materiales de construcción, entre ellos el cemento Portland, y un alto consumo energético. El sector del cemento tiene una capacidad productiva que no satisface la demanda actual, lo que indica la necesidad de inversiones para incrementar la capacidad productiva, dado el grado de deterioro de la tecnología actual instalada(Pérez-Cabrera, 2016).

En el cemento ordinario conocido como Portland el componente principal es el clínker (más del 75 % en la mayoría de los casos). El clínker es producido por el cocido directo de una mezcla de materiales rocosos en hornos de altas temperaturas (4000°C). Para realizar una producción continua de clínker se precisa mantener un alto consumo de combustible que

asegure los valores de temperatura requeridos. Este cemento es uno de los materiales más empleados a nivel mundial, sin embargo, en los procesos de fabricación del cemento grandes cantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) son liberadas a la atmósfera, en este sentido la industria del cemento es responsable de entre el 5 y el 8 % de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$  al emplear alrededor del 6 % del consumo total de energía del sector industrial mundial(Scrivener, 2014).

Debido a esto surgió el concepto de materiales de bajo consumo energético, asociado a la producción a pequeña escala, con materias primas locales, y usando tecnologías simples, de muy bajo consumo de energía convencional. Es así, como para los años posteriores al 2000, el país se centró en un proyecto de producción de cemento ecológico o de bajo carbono(Scrivener, 2015).

En la nueva formulación de cemento la novedad consiste en que se permite sustituir una buena parte del clínker (más de 50%) por una combinación de arcilla calcinada, conocida como “Metakaolin”, y carbonato de calcio en forma de piedra caliza(Fernández et al., 2011).

Una vía importante para mejorar la sostenibilidad en la producción del cemento es disminuir el factor de clínker, mediante la adición de materiales cementicios suplementarios (MCS). Se ha demostrado la factibilidad del uso de un aglomerante resultante de la mezcla clínker + arcilla activada térmicamente (A.A.T). + Carbonato de calcio, este producto a dado en llamarse Cemento de Bajo Carbono o  $\text{LC}^3$ (Alujas and Martirena, 2010).

Se demuestra la factibilidad técnica de un material desarrollado en sinergia con el  $\text{LC}^3$  para ser fabricado en condiciones no industriales Este aglomerante es resultado de la mezcla de cemento P 35 + piedra caliza + A.A.T procedente esta última de los desechos cerámicos (DC) de la industria ladrillera y otras análogas, sin embargo la idoneidad de estos materiales depende, entre otros factores, del índice de actividad puzolánica, la que en este caso puede estar relacionado con el régimen térmico a que es sometida la arcilla durante el proceso de cocción cerámica y las propiedades químico – físicas del material originario. Este producto se propone para su uso en la producción de elementos como los bloques huecos de hormigón, morteros y hormigones sin compromiso estructural. Por otro lado, la obtención descentralizada de  $\text{LC}^3$  se realiza elaborando la siguiente formulación, 50% de cemento P-35, 30% de AAT obtenida a partir de la fina molturación de elementos cerámicos (ladrillos

rojos cocidos, rasillas, etc.) y 20% de piedra caliza finamente molida (Machado and Martirena, 2017).

El cemento producido en el 2015 clasifica como un cemento P-35, a pesar de tener solamente un 50% de clínker. La realización de la evaluación económica y ambiental del cemento de bajo carbono, usando modernas herramientas de cálculo, prueba la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la producción superior al 30%. El cemento LC<sup>3</sup>, tiene un costo de producción ligeramente menor que el cemento P-35, con 88% de clínker, y permite una mayor rentabilidad de la inversión. La introducción del LC<sup>3</sup> permite aumentar la producción de cemento entre un 17-45% en dependencia de la tecnología, para la disponibilidad actual de clínker. Esto permite abastecer la creciente demanda y evitar la realización de importaciones para cubrir el déficit (Martirena, 2015a).

Según las pruebas realizadas por el equipo técnico el LC<sup>3</sup> alcanza propiedades similares y hasta superiores al cemento Portland, ha sido usado con buenos resultados en una amplia gama de aplicaciones, que incluye la producción de bloques, elementos prefabricados, baldosas hidráulicas y otras obras de albañilería (Medina, 2016).

El cemento cumple con los requerimientos de comportamiento mecánico y de durabilidad exigidos por las normas. Este ha sido aplicado con éxito para su uso general en la producción de una variada gama de productos de hormigón (Medina, 2016).

La aplicación de desechos cerámicos en formulaciones para aglomerantes en base al CPO donde disminuye el factor de clínker, ya sea de forma industrial o en producción local, constituye una adecuada contribución para la disminución del consumo de energía y las emisiones de gases contaminantes y con ello apoyar a la disminución de los efectos del cambio climático.

El cemento LC<sup>3</sup> ha dado un paso significativo en la industria cementera del país, logrando obtener mediante materiales de bajo costo ahorros en la producción local. En este trabajo se pretende obtener el LC<sup>3</sup> en el municipio de Fomento, Sancti Spiritus con tecnologías apropiadas y fuentes de desechos cerámicos provenientes de arcillas locales, que alcance valores de resistencia y otros parámetros similares al CPO. Sin embargo, la producción local de diferentes elementos constructivos aún no ha incorporado la sustitución del cemento Portland por el LC<sup>3</sup> de producción local al no contar con estudios que demuestren

fehacientemente su idoneidad técnico económico. Lo anteriormente expuesto constituye la **situación problemática** de la presente investigación; a partir de la cual se arriba a la siguiente interrogante científica.

### **Interrogante Científica**

¿Qué relación se establece entre las propiedades del material arcilloso de la región de estudio precursor de los desechos cerámicos al obtener material cementante según la formulación para la obtención local de LC<sup>3</sup>, y la obtención de elementos de hormigón y morteros que cumplen las normativas nacionales?

### **Hipótesis de investigación**

Teniendo en cuenta que la arcilla con la que se obtienen productos de cerámica roja (ladrillos, rasillas, etc.) en talleres de producción no industrial procede de yacimientos con adecuadas características físico, químicas y mineralógicas. Entonces a través del tratamiento térmico de este material en los hornos artesanales es posible la obtención de material con reactividad puzolánica, lo cual permite obtener cemento LC<sup>3</sup> según su formulación para talleres locales y a su vez obtener elementos de producción local como: bloques, vigas, viguetas, y otros elementos al cumplir las regulaciones de calidad para su producción.

### **Objetivo General**

Validar la producción local de cemento de bajo carbono para su utilización como aglomerante a partir de procesos y arcillas de la localidad, así como su uso en diferentes elementos constructivos

### **Objetivos específicos**

- ✓ Evaluar el proceso de obtención de materiales cerámicos a escala de producción artesanal, esclareciendo el régimen térmico a que es sometida la arcilla en cada caso.
- ✓ Determinar el cemento de bajo carbono a partir de desecho cerámico en el municipio de Fomento, Sancti Spíritus.
- ✓ Obtener elementos constructivos a partir del LC<sup>3</sup> producido localmente

### **Tareas científicas**

- ✓ Determinar las características de las arcillas en el municipio de Fomento
- ✓ Determinar las características físicas mecánicas del cemento LC<sup>3</sup> obtenido a partir de los materiales locales.
- ✓ Determinar las dosificaciones necesarias para la obtención de diversos elementos constructivos fabricados habitualmente en las industrias locales.
- ✓ Evaluar las propiedades de diferentes elementos fabricados con LC<sup>3</sup> y su correspondencia con las normativas nacionales.

### **Novedad Científica**

Establecer dosificaciones de morteros y hormigones que permite fabricar elementos constructivos a partir de la obtención del LC<sup>3</sup> en la producción local, cumpliendo los requisitos de calidad normalizados.

### **Estructura del Trabajo de Diploma**

Resumen.

Introducción.

Desarrollo.

Capítulo I: Producción del cemento de bajo carbono (LC<sup>3</sup>) en el municipio de Fomento, a partir de la utilización de desechos cerámicos.

Capítulo II: Fabricación del cemento de bajo carbono (LC<sup>3</sup>) en la escala de producción local, así como la obtención de elementos a partir de dicho cemento.

Capítulo III: Evaluación del comportamiento del cemento de bajo carbono producido, así como los elementos obtenidos en la localidad de Agabama, Fomento

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

## **CAPITULO I: Producción del cemento de bajo carbono (LC<sup>3</sup>) en el municipio de Fomento, a partir de la utilización de desechos cerámicos.**

### **1.1 El Cemento portland (CPO). Generalidades**

El cemento portland, es un tipo de cemento hidráulico, que al realizarse la mezcla con áridos, agua y fibras de acero se produce una transformación en la cual obtendremos una masa muy duradera y resistente, denominada hormigón. El endurecimiento de la mezcla ocurre cierto tiempo después del amasado, permitiendo, por lo tanto, moldear el producto resultante.

El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla de materias primas (crudo, pasta o harina finamente dividido, íntimamente mezclado y homogéneo) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pequeñas cantidades de otras materias (Díaz-Ponce, 2012).

Las materias primas para la fabricación del cemento portland consisten esencialmente en caliza, marga, arena silícea y arcilla. También se emplean otras adiciones tales como yeso o materiales puzolánicos. Las calizas y margas aportan el óxido de calcio y las arcillas son responsables del aporte de los óxidos metálicos (Díaz-Ponce, 2012).

El proceso de elaboración consiste en mezclar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas finamente, de manera que el CaO de la caliza y los compuestos de la arcilla (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) resulten homogenizados adecuadamente. El producto resultante, denominado polvo crudo, se calcina en un horno a temperaturas de 1450°C-1600°C, donde se produce la fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker. Ver tabla 1.1 (Díaz-Ponce, 2012).

#### **1.1.1 Tipos, usos, y características del cemento portland:**

Tipo 1 - Se trata de un cemento normal y se obtiene tras mezclar el clínker con el yeso. Se usa generalmente en las obras de ingeniería.

Tipo 2 - Nos encontramos ante un cemento modificado. Su acción es moderada a la resistencia de los sulfatos y es conveniente emplearlo cuando demandamos calor un tanto moderado de hidratación. Dicho cemento va adquiriendo resistencia con más lentitud que el

nombrado anteriormente, finalmente lo iguala y, por lo tanto, obtiene la misma resistencia. Es empleado frecuentemente en alcantarillados, tubos y zonas industriales.

Tabla 1.1 Componentes del clínker.

| <b>Óxidos componentes de clínker</b>                           | <b>%</b> |
|--|----------|
| Óxidos de calcio "Cal" (CaO)                                   | 60-69    |
| Óxidos de Silicio "Sílice"                                     | 18-24    |
| Óxidos de Aluminio "Alúmina" (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 4-8      |
| Óxidos de Hierro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )              | 1-8      |

Tipo 3 - Tal cemento consta de una elevada resistencia inicial y es tremendamente recomendable cuando necesitamos una resistencia acelerada. En un caso en concreto y en lo que a la construcción se refiere. El hormigón Portland realizado con el cemento tipo 3 aumentará increíblemente la resistencia al compararlo con el tipo 1 y el 2. Hay que tener presente que el cemento tipo 3 incrementa la resistencia inicial a niveles muy altos.

Tipo 4 - Tiene un bajo calor de hidratación y tal suceso se consigue si limitamos los compuestos que más pueden influir, es decir, C<sub>3</sub>A y C<sub>3</sub>S. Dicho cemento gana resistencia lentamente. Se utiliza habitualmente en grandes obras, presas y túneles.

Tipo 5 - Una de las características del cemento Portland tipo 5 es su resistencia a la acción de los sulfatos, por tanto, lo emplearemos en estructuras hidráulicas y plataformas marinas. ¿Cómo lograremos la resistencia al sulfato? Lógicamente al minimizar el contenido C<sub>3</sub>A, ya que dicho compuesto es muy susceptible a lo que se refiere al sulfato.

### **1.1.2 Características físicas de los cementos portland**

El cemento tiene ciertas características físicas y químicas que permiten que se realicen cambios en él, mejorando su rendimiento si se dan de la manera adecuada, ya que por el contrario se pueden alterar dando como resultados cementos de baja calidad y poco resistentes.

Las características físicas de los cementos portland están íntimamente ligadas con su contextura, como su nombre hace referencia, su forma, tamaño, su manera de reaccionar y transformarse frente a estímulos de origen físico.

### **Finura de molido**

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tiene lugar durante su fraguado y primer endurecimiento.

Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento hidratan solo en profundidades de 0.01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que, en general, resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. Lo deseable es que un cemento alcance sus resistencias normadas, a las distintas edades, más bien por razón de calidad de clínker que por razón de finura de molido. Las nuevas normativas no incluyen prescripciones para finura de molido.

### **Tiempo de fraguado**

Tiempo que tarda la pasta de cemento en adquirir rigidez, desde el inicio hasta el fin del fraguado. La velocidad de fraguado de un cemento viene limitada por las normas, estableciendo un período de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual deben producirse el inicio y el fin del fraguado. Ambos conceptos se definen de un modo convencional, mediante la aguja de Vicat, ya que el fraguado es un proceso continuo que inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento, sin solución de continuidad. Las penetraciones de la aguja de Vicat sobre una probeta de pasta normal de cemento, en función del tiempo, dan referencia del proceso de fraguado.

El límite inferior que marca la tabla 1.2 para el comienzo del fraguado es pequeño y puede resultar insuficiente para muchas obras de hormigón, en las que las distancias de transporte

sean grandes. Debe comprobarse, en tales casos, que el principio de fraguado del cemento se aleja del mínimo admitido.

El fraguado es más corto y rápido en su comienzo cuanto más elevada es la finura del cemento. La meteorización de este (almacenamiento prolongado) aumenta la duración del fraguado.

La presencia de materia orgánica (que puede provenir del agua o de arena) retrasa el fraguado y puede llegar a inhibirlo. A menor cantidad de agua de amasado, así como a mayor sequedad del aire ambiente, corresponde un fraguado más corto.

Tabla 1.2 Tiempo de fraguado de acuerdo con la resistencia mecánica

| Resistencia del Cemento | Principio del Fraguado(min) | Final del Fraguado(Horas) |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Muy Alta                | >45                         | <12                       |
| Alta,Media y Baja       | >60                         | <12                       |

(Massana Guitart, 2010)

### Potencial de Hidrógeno

Este parámetro puede ser muy importante frente a fenómenos como la corrosión y la durabilidad; El cemento puede ser muy alcalino a causa de la presencia de portlandita. Desde el punto de vista de la durabilidad la portlandita, es la mayor contribuyente a la elevada alcalinidad o reserva alcalina del hormigón, manteniendo al material en la zona de pasivación del acero de las armaduras, lo que las protege de una posible oxidación.

Al ser el producto hidratado de mayor solubilidad, actúa como una disolución amortiguadora del pH, impidiendo fenómenos de degradación al encontrarse expuesto a fluidos. (Massana, 2010, p.41). Por otro lado, hace al hormigón más vulnerable frente a compuestos ácidos y su mayor solubilidad posibilita una teórica disminución de la densidad del material.

### Expansión y retracción

Los ensayos de estabilidad de volumen tienen por objeto manifestar, a corto plazo, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debido a la hidratación de óxido de calcio y/o de óxido de magnesio. La retracción está relacionada con el agua de amasado no combinada.

La retracción por secado es considerada en muchos casos “la verdadera contracción”. Este fenómeno involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cemento y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel, que modifica el volumen en el hormigón. La retracción por carbonatación ocurre debido a la reacción del cemento hidratado con el dióxido de carbono en el aire, en presencia de humedad.

### **Calor de hidratación**

La propiedad de liga de las pastas de cemento se debe a la reacción química entre el cemento y el agua, la cual provoca una reacción exotérmica que produce el llamado calor de hidratación.

El término hidratación es una descripción global de varios fenómenos a raíz de la reacción química del cemento portland y agua. Esta reacción deriva la formación de una pasta de cemento hidratado creando masa sólida cohesiva y adherente, lo cual resulta el elemento esencial del hormigón.

### **Rigidez y resistencia mecánica**

La pasta al fraguar adquiere rigidez y, con el tiempo, resistencia. La resistencia mecánica de un hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea la del cemento empleado.

Pero esta característica no es la única que debe buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igual de necesarias, como la durabilidad. La resistencia de un cemento se determina a través de un mortero normalizado amasado con arena de características y granulometría determinadas y con relación agua/cemento establecida. (Díaz-Ponce, 2012).

La tabla 1.3 describe cómo actúan algunas de las propiedades físicas del cemento de acuerdo con sus componentes químicos.

#### **1.1.3 Impactos en la reducción del factor de clínker:**

En la elaboración del cemento portland, la producción de clínker representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO<sub>2</sub>, en este caso más del 50% de las emisiones liberadas se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínker. Se estima que por cada tonelada de

cemento producida se emite entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> a escala global (Habert, 2010).

El factor de reducción de clínker 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 reconocido hasta hoy en los niveles de sustitución para los cementos puede variar, llegando hasta el 35 % en dependencia del tipo del material cementicios utilizado (Turanli 2004).

Tabla 1.3 Propiedades que aportan los componentes del cemento

| <b>Propiedades</b>       | <b>S<sub>3</sub>C</b> | <b>S<sub>2</sub>C</b> | <b>C<sub>3</sub>A</b> | <b>C<sub>4</sub>AF</b> |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Velocidad de hidratación | Grande                | Pequeño               | Instantánea           | Grande                 |
| Calor de hidratación     | Grande                | Pequeño               | Grande                | Pequeño                |
| Resistencia mecánica     | Grande y pronta       | Grande y tardía       | Escasa                | Escasa                 |

Fuente:(Massana Guitart, 2010).

El aumento de los niveles de sustitución de clínker ha estado liderado por las regiones con economías emergentes, como Latinoamérica, India y China, que se encuentran por encima de la media mundial de 22 %(Contreras, 2015), es muy importante el aumento del factor de clínker por el impacto que causa con respecto a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, al mismo tiempo que posibilitan el aumento de los volúmenes de producción de cemento sin grandes costos de inversión asociados (WBCD, 2012)

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. Existe una estrategia común, sustentada en cuatro líneas de trabajo fundamentales, a saber, (i) la mejora en la eficiencia de los procesos, (ii) el uso de fuentes alternativas de combustibles, (iii) la captura y almacenaje de CO<sub>2</sub> y (iv) la reducción del factor de clínker mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios. En este sentido, las acciones a tomar

para la reducción de las emisiones causadas por la industria del cemento deben ser consideradas desde un enfoque regional, atendiendo a las características geopolíticas y tecnológicas de cada país, organización o fábrica (WBCD, 2012).

### **1.2 Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).**

Los MCS son adiciones sílico aluminosas que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, que, molidas finamente, en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de carbono (CH) liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes. Cuanto mayor sea el contenido de sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas, más reactiva resultará la adición. Este tipo de adiciones reciben también el nombre de puzolanas o materiales puzolánicos(OLIVIER, 2012).

En general las puzolanas pueden clasificarse en dos grandes grupos, puzolanas naturales y artificiales y su efecto en morteros y hormigones, ya sea por su adición al cemento o al propio hormigón, ha sido ampliamente reportado en la literatura. Las propiedades de las mezclas fabricadas, dependerán del tipo de puzolana empleada, pero de manera general, incrementan la resistencia a edades avanzadas y la impermeabilidad del producto final, aunque también tienden a incrementar la demanda de agua(Bergal, 2017).

#### **1.2.1 Las puzolanas como material de construcción**

La utilización de puzolanas como reemplazo parcial del cemento, contribuye a la disminución de la cantidad de clínker utilizado y de esta manera disminuye la emisión de CO<sub>2</sub>, mejorando, además, cuando se las utiliza en el porcentaje adecuado y poseen las características requeridas, la resistencia y durabilidad de los morteros realizados (Tironi, 2013).

El uso de las puzolanas en la industria del cemento viene sucediendo desde hace varias décadas, estas reaccionan con la cal que liberan las fases del cemento al hidratarse y forman el gel de tobermorita, responsable de darle las propiedades resistentes a los cementos

Las puzolanas naturales y las que se obtienen como subproducto de otros procesos se adicionan directamente al cemento, mientras que las artificiales que no se obtienen como

subproductos de otros procesos necesitan de un proceso de activación adicional para poder ser agregadas al cemento.

Las puzolanas contienen constituyentes que se combinan con la cal a temperatura ambiente, en presencia de agua dan lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos o gel de tobermorita.

Las propiedades de los cementos con puzolanas incluyen:

- Mayor durabilidad por efecto de una menor porosidad y cal libre
- Menor calor de hidratación y permeabilidad que los hace idóneos en la construcción de presas y obras que necesiten grandes masas de hormigón
- Menor expansión en volumen durante el fraguado.
- Mejor trabajabilidad con menor presencia de segregación
- Menor costo de producción
- Promueve el desarrollo sustentable al consumir menor cantidad de energía para su elaboración.

Ante estas ventajas, hay que mencionar los pequeños inconvenientes que presentan estos cementos adicionados

- Mayor cantidad de agua de amasado para una consistencia dada
- Menor resistencia a la compresión a edades tempranas

### **1.2.2 Actividad puzolánica:**

La actividad puzolánica se define como la capacidad de una puzolana de reaccionar con la cal y generar resistencias. Existen varios métodos para medir la actividad puzolánica, desde los métodos tradicionales de compresión hasta los que se basan en conductividades de los iones  $Ca_2$ .

Los principios para medir la actividad puzolánica se presentan a continuación:

- Métodos tradicionales de resistencia a la compresión Estos métodos se basan en la evaluación de las resistencias a compresión que generan las puzolanas al reaccionar con la cal y formar el gel de tobermorita Por ejemplo ASTM y UNE.
- Métodos alternos: Estos métodos se basan en la medición directa o indirecta de un reactivo, detectando el avance de la reacción, como ejemplo se tiene el método de ataque florentino que se basa en la disminución de la cal libre del sistema en medio ácido, y el de conductividad de Luxan que se basa en la conductividad eléctrica de la puzolana en soluciones de cal. Para utilizar estos métodos se necesita hacer una calibración previa con los resultados de resistencias a la compresión, sin embargo, la medición puede ser afectada por un alto contenido de álcalis (Díaz-Ponce, 2012).

### 1.2.3 Reacción puzolánica:

En el fraguado del cemento Portland se liberan grandes cantidades de hidróxido de calcio o cal, hasta un 20 o 30 % de todo el cemento hidratado, como consecuencia de la hidratación de la alita y la belita principalmente, que al reaccionar con el agua produce el gel de tobermorita y el hidróxido de calcio las cuales se pueden expresar de manera general para pastas de alita y belita completamente hidratada de la forma siguiente:



Respecto al hidróxido de calcio liberado, este no posee propiedades cementicias, por lo que representa un grave problema en el concreto, ya que puede ser lixiviado por el agua y reaccionar con determinados agentes químicos, lo que puede provocar expansiones que debilita la estructura y la resistencia química del hormigón. Por lo tanto, la presencia de la puzolana en el cemento logra la desaparición o por lo menos la disminución de la cal libre, mejorando las propiedades químicas y físicas de resistencia en el mismo, los iones calcio en solución reaccionan con la puzolana formando productos similares al gel de tobermorita (Tironi, 2013).

Para el caolín activado ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) los productos de reacción que se obtienen son la tobermorita (C-S-H), gelinita hidratada ( $\text{C}_2\text{ASHg}$ ) y pequeñas cantidades de aluminato de calcio hidratado ( $\text{C}_4\text{AH}_3$ ).

### **1.2.4 Cenizas volantes y fundidos granulados:**

En el grupo de las puzolanas, de igual modo se encuentran las cenizas volantes, que son recogidas como residuo muy fino de la quema de combustible fósiles en centrales termoeléctricas y otras industrias, se colecta en las cámaras de deposición y en los filtros de las centrales térmicas. En las cámaras de los hogares de las actuales calderas de vapor, las cenizas volantes caen fundidas y lo mismo que ocurre con las escorias de alto horno, son enfriadas por vertido directo sobre agua, obteniendo así los llamados granulados fundidos, estos son específicamente más densos que las cenizas volantes, hacen más fácil su transporte y elaboración ulterior y contienen poco o nada de partículas de carbón o de coque. Las cenizas volantes y los granulados fundidos son empleados como materiales de asiento en su aplicación a obras subterráneas y como arena fina de los áridos para el hormigón entre otras aplicaciones.

Las cenizas de la hulla son, de modo preponderante, de naturaleza arcillosa, se aproximan, por su composición, a las puzolanas y su contribución a las resistencias está situada, a menudo, a mayor altura. En Francia se ha recomendado la aplicación simultánea de cenizas volantes y de arena de escorias, en Alemania han optado por la defensa de esa aplicación de las cenizas volantes (Lindner, 2005).

### **1.2.5 Las Arcillas**

Entre los materiales utilizados como puzolanas, se encuentran las arcillas activadas térmicamente (AAT)(Machado and Martirena, 2017), el rango de temperaturas para su activación (550 °C a 900 °C) es inferior a la temperatura de clinkerización (1450 °C), lo que implica un menor consumo de energía con la consecuente disminución en la emisión de CO<sub>2</sub>. Además, uno de los productos de reacción en la activación de las arcillas es H<sub>2</sub>O y no CO<sub>2</sub> como en el caso del clínker (Siddique and Klaus, 2009)

Las arcillas calcinadas se comportan como puzolanas si, en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio procedente de la hidratación del cemento portland (CP) a temperatura ambiente, dando lugar a compuestos insolubles y estables que actúan como conglomerantes hidráulicos (Sabir et al., 2001).

### 1.2.5.1 Estructura y composición de las arcillas.

Las arcillas están formadas por distintas especies mineralógicas, que según su preponderancia le confieren sus peculiares características. Las arcillas además de los minerales de arcillas propiamente dichos, poseen sílice libre que generalmente es cuarzo cristalino de tamaño mayor a 10 micrones, carbonatos de diversos tamaños, feldespatos generalmente alcalinos y alcalinotérreos, compuestos de hierro y titanio, sales solubles, materia orgánica y residuos carbonosos. Así, por ejemplo, el término caolín designa una arcilla con un elevado porcentaje de caolinita y un bajo contenido de impurezas en general, especialmente óxido férrico; una arcilla illítica tendrá el mayor porcentaje del mineral Illítica y una arcilla esmética el mayor porcentaje de algunos de los minerales del grupo de las esméticas, por ejemplo, Montmorillonita.

Los minerales arcillosos se pueden describir por estructuras de capas tetraédricas en combinación con capas octaédricas de  $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$  (Gibbsite) o  $\text{Mg}_3(\text{OH})_4^{2+}$  (Brucita). Las que tienen una capa tetraédrica y una capa octaédrica son las 1:1 (TO), las que tienen una capa octaédrica entre dos tetraédricas son las 2:1 (TOT).

El grupo de la caolinita dentro de las arcillas es del tipo 1:1 su estructura consiste en una capa tetraédrica de sílice vinculada a una capa octaédrica de alúmina, cuya estructura es muy similar a la de la Gibbsite salvo que algunos hidroxilos son sustituidos por oxígenos,  $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ . Se debe tener en cuenta que las láminas individuales (1:1) no están vinculados entre sí; se mantienen unidas únicamente por interacciones Van der Waals, que son muy débiles (Tironi, 2013).

Dentro del grupo de las arcillas 2:1, las dos arcillas más sencillas son la pirofilita,  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , y el Talco,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . En la Pirofilita, cada tercer sitio octaédrico está vacante, por lo que se dice que es dioctaédrica; mientras que la serpentina y el talco son trioctaédricas.

### 1.3 Arcillas calcinadas como material cementicios suplementario

Cuando la arcilla es sometida a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicos activos en virtud de las reacciones y las transformaciones en las que, junto a la estructura y constitución mineralógica de partida y a la

composición química, juegan importantísimo papel como variables la temperatura y el tiempo de tratamiento (Tironi, 2013). La arcilla tiene, pues, el doble carácter de producto de erosión y de fracción inorgánica activa del suelo (Herrera, 2008).

### **1.3.1 Arcillas caoliníticas: metacaolín**

Actualmente son bien conocidas las ventajas económicas y medioambientales de la sustitución del clínker de cemento por otros materiales cementicios suplementarios. Las arcillas calcinadas en forma de metacaolín han recibido por ejemplo especial atención en años recientes. Se conoce que estas adiciones, cuando se añaden a morteros y hormigones, mejoran tanto su resistencia mecánica como su durabilidad. El empleo de arcillas calcinadas en sustitución del CPO favorece la formación de productos de hidratación más estables, principalmente monosulfos del tipo hemicarbo y monocarbo, lo cual es conveniente para el hormigón ante la posible acción de diferentes mecanismos de degradación (Samet et al., 2007)

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín (MK). Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento portland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración del ion cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente al ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Talero, 2008).

El inconveniente del uso de metacaolín se centra en la necesidad de arcillas puras en mineral caolín para su producción y los altos costos energéticos asociados a este proceso. Formas viables de disminuir estas desventajas serían el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza, unido a un eficiente proceso energético de producción durante su calcinación. El presente trabajo emplea como materia prima un suelo arcilloso de bajo grado de pureza de mineral caolín. En trabajos precedentes (Castillo, 2010), se demostró como arcillas calcinadas provenientes de suelo arcilloso con bajo grado de caolinita poseen muy buenas propiedades puzolánicas.

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 and 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 AAT – caliza. Los resultados demuestran que hasta el 45 % de sustitución, permite obtener resistencias mecánicas superiores al cemento portland, desde edades tempranas e incluso para sustituciones del 60 % se logra el 93 % del rendimiento con respecto al cemento portland (Vizcaino, 2014).

### **1.4 El Sistema clínker-arcillas calcinadas -carbonato de calcio**

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

La formulación de sistemas ternarios a base de cemento cal y puzolanas se basa en la suposición de que a mayor sustitución de cemento portland, disminuye la cantidad de iones  $\text{Ca}^{2+}$  que se encuentra en la solución de agua de los poros, producida por la hidratación del cemento portland y reduciendo la posibilidad de que tenga lugar la reacción puzolánica. También se puede evitar el fenómeno reportado como auto neutralización, debido a la ausencia de hidróxido de calcio, el que se consume totalmente en la reacción puzolánica como es el caso de los hormigones de alto volumen de sustitución (Fernandez, 2013).

Varios estudios realizados anteriormente prueban que el metacaolín puede sustituir cemento en una proporción de hasta un 30%. La piedra caliza molida es una fuente barata y ampliamente disponible de mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Es usada con frecuencia como relleno

en la producción de cemento, en pequeñas proporciones. Cuando las adiciones son en el orden del 5% de clínker, el cemento resultante exhibe propiedades iguales o ligeramente superiores debido al aumento de compacidad. Cuando la adición está entre 10-15%, los efectos resultantes son negativos (Fernandez, 2013).

### **1.5 Características de los principales yacimientos caoliniticos reportados en Cuba.**

En Cuba no existen considerables reservas de arcillas caolínicas de alta pureza, sin embargo existe en el territorio nacional yacimientos de arcillas con contenidos moderados y bajos de caolinita con la presencia de otros minerales arcillosos potencialmente activos, ejemplo de esto son los seis yacimientos arcillosos estudiados de los cuales se obtuvieron adecuados resultados, ellos son: Carranchola-La Moza (MG) ubicado en Manicaragua provincia de Villa Clara, se encuentran arcillas arenosas empleadas en la fabricación de ladrillos; Pontezuela (PZ) ubicado en la provincia de Camagüey en la cual podemos encontrar principalmente caolín blanco y arcillas coloreadas; Sectores La Loma (LL) y Loma Sur (LS) se localizan en la ciudad de Ciego de Ávila, la mineralización caolínica detectada presenta una gran variedad de características dentro de las cuales se destaca una variación de coloración del color blanco (Jiménez, 2016).

Por otro lado Cayo Guam (CG) se localiza en la provincia de Holguín, la génesis de este yacimiento está determinada por la alteración de los feldespatos producto de la meteorización de los gabroides, El Yigre (YG) se encuentra por el norte de los municipios de Yaguajay y Chambas, la arcilla es el componente principal de este depósito, destacándose dos tipos: las de color gris a verdoso y las de color amarillo ocre a pardo rojizo, Castaño (CT) ubicado en las cercanías de Cabaiguán está compuesta por numerosas formaciones sedimentaria desde el cretácico hasta el cuaternario (Estopiñales, 2016).

La mayor cantidad de los que contienen caolín se encuentran en el occidente del país, particularmente en la Isla de la Juventud y Pinar del Río; se ubican también depósitos con diferentes grados de interés en Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y más al oriente, Camagüey, Las Tunas, Holguín y Santiago de Cuba. En el resto del territorio nacional, según la Oficina Nacional de Recursos Minerales, aparecen además puntos y manifestaciones de forma diseminada (Estopiñales, 2016).

## **1.6 Residuos de cerámica**

La industria cerámica en su proceso de producción de revestimientos, ladrillos y azulejos, genera gran cantidad de residuos. Estos residuos cerámicos, generalmente, son inherentes a los procesos de quema y transporte dentro de la propia industria y cuando no son destinados al reciclaje, acarrearán pérdidas económicas y problemas ambientales (Lima, 2004). Algunos trabajos plantean el reciclaje de esos residuos mezclando las materias primas naturales para la producción de cerámica. Otra forma de usar los residuos es como adición mineral a través de su molienda y tamizado. A partir de ahí, cuando se incorporan en morteros y hormigones contribuyen a la resistencia mecánica, a través de las reacciones puzolánicas de metacaolinita residual con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Contreras, 2015)

### **1.6.1 Proceso de fabricación de productos cerámicos**

En la actualidad, en cualquier fábrica de productos cerámicos se llevan a cabo una serie de procesos estándar, que comprenden desde la elección del material arcilloso hasta el proceso de empaquetado final. Existen dos formas de producción, la artesanal y la industrial. Estas dos formas de producción tienen los mismos pasos o secuencia productiva, únicamente diferenciada en los instrumentos, métodos y herramientas utilizadas para la producción. Por lo que se puede afirmar que la tecnología de producción de ladrillos consiste en una serie de subprocesos, entre los que se encuentran la preparación del material; el moldeado y/o conformación, así como los tratamientos térmicos por secado y cocción (Díaz, 2011)

### **1.6.2 Producción de ladrillos y otras cerámicas rojas.**

En la producción industrial, como resultado de las relativamente bajas temperaturas de cocción y de las modernas tecnologías utilizadas, el consumo varía entre 0,8 y 2,1 MJ/kg de producto obtenido, mientras que en los demás sectores de la cerámica de construcción y fina, el consumo medio es notablemente mayor, pudiendo elevarse hasta 8 MJ/kg (Duménigo, 2012).

La transformación del material seco en uno totalmente estable deviene a través de diversas modificaciones físicas y químicas que sufren los componentes minerales por efecto de la temperatura (Bianucci, 2009).

La arcilla destinada a la producción de ladrillos se desmenuza con rodillos y a continuación se le incorpora agua en una mezcladora, se amasa de nuevo y se carga en una amasadora y extrusora horizontal. A continuación, la arcilla plástica extruida se corta a la medida. Se obtiene material plástico semi-seco y rígido por laminación, tamizado y prensado mecánico. Estos procesos igualmente pueden ser manuales lo cual es muy común en la producción local artesanal (Bianucci, 2009).

### **1.6.3 Polvo de ladrillo como puzolana:**

Los ladrillos y otros materiales cerámicos se han usado en mezcla de mortero desde la antigüedad. Aunque la química de la reacción puzolánica puede no haberse entendido antes del siglo XIX, la experiencia ha demostrado que la adición de ladrillos y azulejos en polvo para morteros puede proporcionar propiedades hidráulicas. No todos los ladrillos, sin embargo, tienen un adecuado potencial puzolánico. El proyecto Smeaton y otros estudios han sido fundamentales para el establecimiento de los parámetros en la actividad puzolánica del ladrillo con respecto a la temperatura de cocción y el tamaño de las partículas. El proyecto Smeaton ha demostrado que el polvo de ladrillo con un tamaño inferior a 75 micras tenía un mayor impacto en acelerar el tiempo de fraguado y la creación de una mayor resistencia en el mortero hidráulico. Además, se determinó que los ladrillos tratados por debajo de 950 °C tienen el efecto más positivo sobre la resistencia y durabilidad, pero no era concluyente en cuanto a si esto solo estaba relacionado con la temperatura de cocción o asociado con la composición mineralógica del ladrillo (Rogers, 2011).

De hecho, la composición de la arcilla a partir de la cual se fabrica el ladrillo determina la calidad y características de este, así como su potencial para actuar como una puzolana. Como regla general, las arcillas que contienen del 20-30 % de alúmina, del 50-60 % de sílice y el resto consiste en carbonato de magnesio, carbonato de calcio y óxido de hierro se consideran ideales para la fabricación de ladrillos (Rogers, 2011).

### **1.7 Eficiencia de las arcillas calcinadas en pastas de cemento portland**

Diversos autores refieren que la eficiencia de las arcillas calcinadas en relación con la generación de productos hidratados adicionales se encuentra en función de la disponibilidad de hidróxido de calcio presente en la mezcla (proporción de sustitución) y de las

características de la puzolana (actividad puzolánica). Esta eficiencia influye en las propiedades mecánicas y en la estructura de poros de los materiales cementicios, y consecuentemente, en la durabilidad de los mismos (Gongalves, 2009). En este sentido, Gongalves, en su estudio sobre pastas de cemento portland-arcilla calcinada reporta que de los contenidos de sustitución del 10-40 % para la metacaolinita (MK) y los residuos de la producción de ladrillos cerámicos (RC), la que condujo a la generación del mayor volumen de hidratos para la MK fue de un 20 %, mientras que para los RC fue de un 10 %. Esto demostró, según los ensayos realizados, que la presencia de arcilla calcinada como sustituto parcial del cemento promueve un mayor refinamiento de la estructura de poros de los hormigones, aumentando así la resistencia a la penetración de agua y agentes agresivos, como los iones cloruros y los sulfatos, lo que reduce a su vez la probabilidad de deterioro del material y permite un aumento del tiempo de vida útil.

Adicionalmente, la eficacia de la arcilla calcinada depende de las propiedades físicas y químicas del producto final. La distribución del tamaño de las partículas es un efecto físico importante, ya que la arcilla calcinada fina dispersa puede servir como núcleo, mejorando así la hidratación temprana de los sistemas cementantes (Fernández, 2011).

De manera general, el desempeño de las arcillas calcinadas en pastas de cemento portland depende de factores tales como: la composición química, el índice de actividad puzolánica, la proporción de sustitución, la granulometría, la forma y masa específica del material puzolánico, la proporción de los materiales, la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la edad y el grado de hidratación (Gongalves, 2009).

### **1.7.1 Cementos ternarios con arcillas calcinadas**

Se han llevado a cabo investigaciones que combinan ventajas y desventajas de algunas adiciones, dando lugar a nuevas generaciones de cementos ternarios, incluso cuaternarios. Diversos autores han reportado investigaciones de cementos mezclados que emplean adiciones combinadas de cenizas volantes, escorias, microsílíce, puzolanas naturales y caliza en sustitución de determinados porcentajes de cemento portland (Frías, 2013).

Uno de los estudios más interesantes es el realizado por De Weerd, que potencia la reactividad de los carbonatos de la caliza con las fases alumínicas del cemento,

incrementadas a su vez mediante la adición de cenizas volantes. De Weerdts limita los estudios a solo el 35 % de sustitución de cemento portland por la adición.

Los cementos ternarios son aquellos que contienen tres materiales cementicios diferentes, de los cuales dos de ellos constituyen materiales cementicios suplementarios. Las arcillas calcinadas que consisten en minerales de arcilla individuales como la caolinita, montmorillonita y la illítica han estado en el foco de muchas investigaciones, ya que muestran reactividad puzolánica y pueden servir como adiciones al hormigón (Thienel and Beuntner, 2015). Los resultados obtenidos demuestran que la caolinita, resulta ser la más activa una vez sometida a tratamiento térmico, seguida por las montmorillonitas, aunque esta última requiere de temperaturas de calcinación más elevadas; el bajo rendimiento de la illita limita su empleo como puzolana (Fernández et al., 2011). Por eso, las arcillas caolínicas calcinadas (metacaolinita) poseen actualmente mayor potencial de trabajo y, por consiguiente, han sido las más estudiadas.

Otra posibilidad de obtención de la arcilla calcinada es a partir de residuos de industrias que utilizan arcilla como materia prima, así ocurre en la industria cerámica. Las arcillas utilizadas en la producción de ladrillos y tejas de cerámica roja pasan por un proceso de quema y sinterización, alcanzando una temperatura de aproximadamente 900 °C. Variables importantes en la validez del potencial de los residuos cerámicos son el tipo de arcilla utilizada y su proceso de producción, ya que determinan el nivel de actividad puzolánica del residuo generado, debido a que el tipo de arcilla empleada es importante, pues define las composiciones químicas y mineralógicas de los residuos. Con relación al método de producción: la temperatura de calcinación, el tiempo de residencia y la uniformidad de la temperatura en el interior de los hornos pueden afectar significativamente las características de los residuos (Gongalves, 2009).

### **1.8 Cemento de bajo carbono (LC<sup>3</sup>)**

Los cambios en la economía cubana provocarán un incremento significativo de la demanda de cemento en el corto plazo (período 2016-2020). La capacidad productiva actual de la industria de cemento no puede abastecer esa demanda en el corto plazo. Esto producirá un déficit de cemento estimado entre 0.5-1 MM toneladas anuales, que de no existir alternativas tendrá que ser importado a altos costos. La introducción del cemento LC<sup>3</sup> podría contribuir a aumentar la capacidad de producción de cemento en el país en un 17-45% en el corto plazo,

con inversiones pequeñas de ciclo corto, a partir de emplear los niveles actuales de producción de clínker que tiene la industria. Por esta vía podría mitigarse el déficit que se creará, y consecuentemente evitar las importaciones, y brindar un espacio de tiempo para concretar las inversiones en camino (Martirena, 2015c)

La evaluación ambiental demuestra que el nuevo cemento permite reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 25-35% en relación a los cementos producidos en Cuba. Los estudios económicos demuestran la posibilidad de modestos ahorros en relación al P-35. La evaluación de la rentabilidad de un escenario productivo que incluya la producción del cemento LC<sup>3</sup> es muy favorable (Delgado, 2014)

El sector del cemento tiene una capacidad productiva anual de 2.8 MMt de clínker, de la que se reporta una utilización de cerca de un 40%. A pesar de los altos niveles de consumo, la mayoría del clínker (se estima un 75% de la producción) se produce por vía seca. La producción reportada en el 2014 fue de 1.8 MMt. La demanda actual excede la producción, lo que indica la necesidad de inversiones en el sector para incrementar la capacidad productiva y su uso. La tecnología vieja no permite incrementar la utilización de la capacidad actual debido al estado de deterioro y los altos costos de mantenimientos de equipos y facilidades. Por lo tanto, las inversiones se presentan como la alternativa para poner al día la tecnología, pero la rentabilidad de la inversión debe ser demostrada. Cifras oficiales presentan una demanda de 3.5 MM tpa en el 2019. La proyección de esta demanda en la fase pico (2016-2020) implicará crecimientos de 18% anual. Esto se vincula con un incremento de la actividad constructiva, característico de la nueva etapa en la que entra el país.

En el corto plazo la demanda de cemento crece, y sería poco probable poner en explotación nuevas inversiones, ya que la construcción de una nueva planta puede llevar hasta cinco años. Las opciones para dar solución a este problema son: (i) importar grandes cantidades de cemento cuando la demanda sobrepase la producción (estimados de 0.5-1 MM tpa en el período 2018-2020) a costos en el orden de los \$US 120/ton; (ii) maximizar la producción de cementos puzolánicos del tipo PP25 y PP35 usando puzolanas naturales, y (iii) Incrementar la producción de cementos puzolánicos hasta los niveles históricos máximos y complementar con la producción de cemento de bajo carbono, LC<sup>3</sup> (Martirena, 2015c).

### **1.8.1 Propiedades LC<sup>3</sup>**

Los hormigones elaborados con LC<sup>3</sup> de producción local requieren de mayor cantidad de agua y/o aditivo superplastificante para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad en comparación con los hormigones producidos con cemento Portland P-35. Esto se debe a la gran cantidad de arcilla existente en sus composiciones, que es finamente molida por su baja dureza, logrando que estos cementos posean una mayor superficie específica y mayor demanda de agua. Este nuevo sistema cementicio muestra algunas limitaciones ya estudiadas como el no empleo de este en hormigones estructurales, pues se demostró que con un aumento de la sustitución del clínker de más del 45% comienza a decaer el pH del material dando lugar a procesos de carbonatación y futuras corrosiones del acero de refuerzo (Martirena, 2015b)

Según antecedentes (Vizcaino, 2014) el empleo del cemento de bajo carbono producido industrialmente en la fábrica de Siguaney en elementos prefabricados producidos a escala industrial puesto que se mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad expresada a través de la permeabilidad. El cemento ternario propuesto permite lograr reducciones de las emisiones asociadas a la producción de cemento entre un 25 – 35 % con respecto a la práctica diaria sobre la base de la sustitución de clínker por la adición activa arcilla calcinada – caliza. La valoración económica y ambiental de la producción a escala industrial de un cemento con un contenido de aproximadamente 50 % de clínker mediante la adición de arcilla calcinada combinada con caliza, demuestran la viabilidad de su implementación en el país. (Vizcaíno, 2014)

### **1.8.2 Producción local de cemento LC<sup>3</sup>**

Con la experiencia adquirida en la producción industrial del cemento de bajo carbono, Cuba se pone en la punta de los países que buscan alternativas ecológicas para la producción de materiales de construcción y en este sentido el CIDEM ha demostrado la posibilidad de aumentar la producción del LC<sup>3</sup> pero esta vez de manera local. En esta forma de producción los componentes mezclados resultan de la combinación de un 50 % de cemento P-35, 30 % de arcilla calcinada obtenida a partir de la trituración de piezas de cerámicas roja (ladrillos, tejas, tubos, rasillas) y un 20 % de caliza sin calcinar.

La sinergia que ocurre entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y con menos clínker poder brindar mayor resistencia (Castillo, 2010). Tanto la caliza como la arcilla calcinada deben presentar los requisitos exigidos para su utilización en la producción de este cemento, poseer una humedad inferior al 9 % y después de molidas una finura menor o igual al 10 % retenido en el tamiz de 90  $\mu\text{m}$  ya que esta propiedad contribuye al aumento de la resistencia mecánica. Las arcillas calcinadas obtenidas de la quema de piezas de cerámica roja en hornos artesanales deben alcanzar temperaturas entre 700°C-900 °C y con la mayor pureza posible para lograr una adecuada reactividad puzolánica. La caliza no debe presentar terrones de arcilla y su componente principal debe ser el carbonato de calcio (Martirena, 2015b)

La producción local de cemento de bajo carbono puede realizarse en talleres artesanales que posean la infraestructura y las maquinarias adecuadas para almacenar las materias primas, monitorear sistemáticamente la producción del cemento y guardarlo de forma segura para su posterior distribución (Martirena, 2015b). Esta experiencia en la fabricación del cemento ecológico LC<sup>3</sup> a pequeña escala, fue asumida por primera vez en Cuba por el cuentapropista santaclareño Pedro Enríquez Pérez Rodríguez y posteriormente transmitida a la minindustria de Manicaragua, para obtener más surtidos y ofertarlos a precios asequibles, ambos con el asesoramiento del CIDEM (Zerquera, 2013).

La mezcla y el molido de las materias primas se realiza generalmente en molinos de bolas de operación discontinua y carga manual como son el MB-600 y MB-800, donde el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación este se abre para separar el mineral de los cuerpos molturantes. También pueden emplearse molinos de bolas de operación continua tales como el CR 94 y el molino Ricote, donde estos se alimentan de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo. Estos molinos permiten homogenizar y triturar el material hasta convertirlo en polvo fino (Martirena, 2015b).

### **1.9 Características de elementos prefabricados en talleres de producción local**

Los talleres de producción de prefabricado de pequeño formato son talleres donde se elaboran elementos de hormigón de forma descentralizada como: bloques, vigas, plaquetas, losas hexagonales, 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., 2011):

- ✓ 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.

### **1.9.1 Los bloques huecos de hormigón. Generalidades.**

Los bloques huecos de hormigón es el material moderno más popular para construir todo tipo de edificaciones como: viviendas, edificios de oficinas, fábricas y hasta edificios de varios niveles sin necesidad de soporte estructural adicional. El bloque de hormigón es sinónimo de economía y versatilidad, aplicándose a todas las formas constructivas. Es adaptable, creativo y relativamente fácil de usar. Estos soportan altas cargas, resisten el fuego, tienen caras y lados bien formados y son uniformemente de la más alta calidad. Están disponibles en cientos de formas, tamaños, colores resistentes a la intemperie y alta estabilidad ante la exposición a la luz de sol y agentes climáticos (Aguilar, 2014).

Los boques 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, 2001).

Según la NC 247- 2010 —Bloques huecos de hormigón. Especificaciones, los bloques huecos de hormigón son piezas prefabricadas a base de cemento, agua, áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin aditivos, incluidos pigmentos, de forma sensiblemente octaédrica, con dimensiones exteriores no superiores a 500 mm, con una relación alto/ancho inferior a 6, y alto/largo inferior a 1, sin armadura alguna con densidades normalmente comprendidas entre 1700 kg/m<sup>3</sup> y 2200 kg/m<sup>3</sup>. Los mismos se fabrican vertiendo una mezcla de cemento, arena y agregados pétreos (normalmente calizos) en moldes metálicos, donde sufren un proceso de vibrado para compactar el material.

### **1.9.2 Otros elementos prefabricados en talleres de producción de pequeño formato**

En la actualidad el país está inmerso en la producción local de elementos prefabricados, pues así se puede reducir considerablemente los costos en la construcción y abastecer la alta demanda del país, además de utilizar las materias primas propias de la localidad. Para ello se han hecho diversos elementos prefabricados de interés como: vigas, viguetas, plaquetas, elementos de piso, etc. que poseen diferentes funcionalidades.

Los elementos prefabricados (viguetas y plaquetas) de hormigón armado podrán ser utilizados en viviendas para las cargas y luces diseñadas en los sistemas de entresijos y cubierta. En la sección de viguetas la misma varía según las diferentes longitudes, se puede lograr un entre piso estructural de un espesor promedio de 90 mm para luces de hasta 6 metros, lo que proporciona un ahorro de recurso de encofrado a pie de obra. También se

ahorra tiempo de cálculo y de diseño, pues aparecen tabuladas las diferentes soluciones para cada luz. Las plaquetas actúan a la vez como encofrado perdido, con lo que se puede lograr el hormigonado de la carpeta de 5 cm.

Para la realización de estos elementos es recomendable la ejecución de moldes de hormigón ya que, en el aspecto tecnológico, los moldes metálicos utilizados según la experiencia nacional han provocado deformaciones y recrecimiento con pérdidas anuales de \$ 7968.00. Por ello para viguetas con moldes de acero, en caso de emplearse, es mejor utilizar los moldes con gualderas fijas por no poseer móviles con lo que garantizan una mayor precisión de las dimensiones y tolerancias y durabilidad del molde. La variante de producción con moldes de hormigón puede emplearse en las plantas de prefabricados, pues las matrices o moldes deben manipularse con grúa, o producir moldes más cortos para la producción manual (Costrucción., 2006)

La calidad de la superficie dependerá en gran medida del tratamiento y cuidado de los productores, pero la inversión inicial de capital resulta inferior, comparado con los moldes de acero.

Los moldes están diseñados para producir un mínimo de 5 viguetas a lo ancho del mismo, su longitud es de 6000 mm y su altura de 180 mm, los mismos se fabrican en dependencia del diseño estructural en cada entidad. Se optó por optimizar el consumo de madera al combinar en un solo molde la mayor longitud de viguetas con el menor peralte y colocando posteriormente suplementos de madera de 3,6 y 8 cm respectivamente para barrer las 3 secciones transversales requeridas. Las viguetas poseen sus lados laterales con una inclinación, lo cual es suficiente para realizar el desmolde de las mismas, por lo que no es necesario el diseño de moldes con sus lados abatibles(Costrucción., 2006)

### **Tecnología de Producción**

La producción a las viguetas y tabletas puede producirse en tres escalas de producción según se describe en la tabla 1.4 Producción de viguetas y tabletas en tres escalas.

Tabla 1.4 Producción de viguetas y tabletas en tres escalas.

|   |   |                                     |
|---|---|-------------------------------------|
| En plantas de prefabricados Del MICONS                      | Moldes de acero u hormigón para las semiviguetas. | Moldes de acero para las plaquetas  |
| Polígonos municipales o Conjunto de viviendas de Producción | Moldes de acero u hormigón para las semiviguetas  | Moldes metálicos para las plaquetas |
| Pequeños Polígonos  | Moldes de acero para las semiviguetas             | Moldes metálicos para las plaquetas |

### Transportación y Montaje

La transportación puede realizarse en camiones planchas, carretas tiradas por tractores, carretillas, carretones u otros medios de medios de transporte ligero, dependiendo de la distancia entre el centro productor y la obra evitando la fisuración de los componentes.

2. Los polígonos de producción deben estar dentro del municipio para disminuir la distancia de transportación.
3. El montaje es manual y no requiere de grúas para su colocación.

#### 1.9.2.1 Características Técnicas de los elementos

Las viguetas son elementos de sección trapezoidales de hormigón amado de 70 mm en la parte superior y 50 mm en la inferior, con peralte de 150 mm (Fig.1.1). El apoyo mínimo sobre el cerramiento es de 60 mm. La resistencia del hormigón es de  $R'_{bK} = 20$  MPa a los 28 días utilizando aditivos superplastificante N -100 RC, de producción nacional u otro equivalente, para lograr compacidad y resistencia del hormigón con mínimo de cemento. El tamaño máximo del árido grueso no debe exceder de 10mm(Costrucción., 2006).



Fig.1.1 Viguetas de hormigón

Para la colocación de los aceros se debe tener en cuenta las siguientes orientaciones, el refuerzo de acero principal es de 2 barras de 12 mm de diámetro; una a toda su longitud y otra de 2500 mm, así como aros triangulares de 6 mm espaciados a 200 mm cada uno, los aleros para todas las luces no deben exceder de 600 mm.

Para la producción en plantas de prefabricados puede ser pretensadas, siempre que se disponga de esta tecnología y se realiza el diseño del elemento.

En la parte superior de las viguetas sobresalen 150 mm de alambre de 6 mm distribuido a 600 mm destinado al anclaje de las plaquetas.

Estos componentes llevan también unos pases de 19 mm a 6 mm de la base, que debe coincidir con el eje del cerramiento para anclaje correspondiente al resto de la estructura.

Las viguetas se distribuyen a 600 mm al eje para entrepisos y a 900 mm para cubierta. El peso es de 22 Kg por metros, permitiendo la manipulación y montaje por dos o cuatro personas según la longitud (Costrucción., 2006)

### **Secuencia de producción**

1. Limpieza de los moldes (con espátulas y brochas)
2. Aplicar desmoldante. (Aceite recuperado, cera de caña, aceite con petróleo o similar)
3. Colocación de los separadores definiendo las longitudes.
4. Colocación del acero y garantía de recubrimientos.
5. Colocación de pases para el anclaje a los cerramientos.

6. Vertido del hormigón.
7. Fraguado y endurecimiento.
8. Colocación de las viguetas de forma manual. (Utilizando una barra transversal que atraviesa los ganchos de izaje).

La utilización de molde de acero es la solución tecnológica recomendadas en todas las escalas de producción, por su simplicidad y garantía de mantener los parámetros dimensionales, apariencia superficial de las viguetas y durabilidad de los moldes. (Fig.1.2).

Las plaquetas son elementos de hormigón armado de 880mm x 580 mm x 40 mm de espesor.

La resistencia del hormigón es de  $R'_{bK} = 20$  MPa a los 28 días utilizando aditivos superplastificante MAPEFLUID No – 100 RC, de producción nacional o similar, en proporción de 1.2 % del peso del cemento para lograr compacidad y resistencia con el mínimo de cemento. El tamaño máximo del árido grueso no debe exceder de 10mm. El refuerzo de acero se reduce a 3 alambres de 6mm en ambos sentidos.

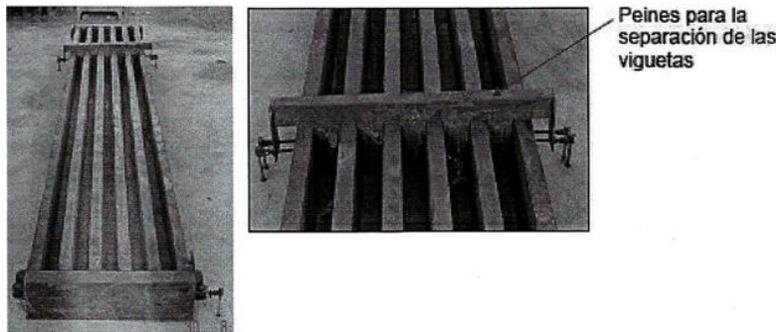


Fig.1.2 Moldes de Aceros

Las plaquetas disponen de un rebajo de 10 x 10 mm en todo el borde superior que permite el alojamiento para el anclaje a las viguetas. Las plaquetas se colocan con el módulo de 900 mm en cubierta y en caso de entrepiso con módulo de 600 mm El peso de la plaqueta es de 49 Kg, permitiendo la manipulación por una o dos personas. (Fig.1.3).



Fig.1.3 Hormigonado de las plaquetas

### 1.10 Conclusiones parciales del capítulo

- El empleo de MCS para la producción de cementos mezclados con altos volúmenes de sustitución de cemento portland constituye una alternativa para el incremento de los volúmenes de producción de cemento necesarios para suplir la creciente demanda nacional y la mitigación del impacto ambiental de la industria de cemento cubana.
- La disponibilidad de las puzolanas naturales y artificiales es limitada tanto geográficamente como económicamente porque actualmente suplen la demanda asociada al sostenido incremento de la producción mundial de cemento. Las arcillas y las calizas, debido a su amplia distribución sobre la corteza terrestre y abundantes reservas constituyen una fuente atractiva de MCS.
- La incorporación de arcillas caoliníticas calcinadas mezcladas permite la reducción del factor clínker de manera que incrementa o mantiene las propiedades de resistencia a la compresión de los hormigones.
- El uso de los desechos cerámicos, procedentes de la producción industrial o artesanal, pueden finamente molidos ser usados como sustitutos parciales del cemento portland en la fabricación de diversos elementos de hormigón.

---

## **Capítulo II: Fabricación del cemento de bajo carbono (LC<sup>3</sup>) en la escala de producción local, así como la obtención de elementos a partir de dicho cemento.**

### **2.1 Generalidades**

En el presente capítulo se presenta el protocolo para la elaboración de cemento LC<sup>3</sup> de producción local en el municipio de Fomento, a partir de la sustitución del P-35 hasta un 50% y con un 30% de la AAT y 20% de la piedra caliza. También se presentan las características del yacimiento de arcilla en la localidad, así como las mediciones de temperatura y las características de los hornos de ladrillos al que es sometida la arcilla en su proceso de transformación para la obtención de dicho cemento. Se muestran los resultados de varios ensayos físicos-mecánicos y químicos a los cuales fue sometido el cemento y sus materias primas basado en el Manual de Calidad para Cementos de Bajo Carbono (Cidem., 2015) de producción local. Se muestran además los resultados al aplicar la producción local de cemento LC<sup>3</sup> en la fabricación de prefabricados de pequeño formato como: bloques, vigas, losas hexagonales, plaquetas, determinando la idoneidad de los materiales empleados según las instrucciones técnicas para la calidad de los productos y materiales de construcción dentro del programa nacional de desarrollo, producción y ventas de materiales con destino al mercado local.

### **2.2 Horno artesanal de Fomento**

El horno utilizado en la cocción de ladrillos en el taller artesanal de El Tejar en el poblado de Agabama, está situado a 4 km del municipio Fomento provincia Sancti Spíritus (Figura 2.1 a), para el encendido y calentamiento inicial tiene como fuente de combustible la leña, con un índice de consumo de 1.25m<sup>3</sup> por cada 1000 ladrillo. Es un horno típico de ladrillos (HORNOS ABIERTOS) con un total de tres aberturas, una de ellas para el control del material de combustible y dos para la introducción y la extracción de las piezas de cerámica. Cuenta con una capacidad productiva de 12000ladrillos, pero se quema alrededor 10000 ladrillos en cada ciclo de producción o quema. El ancho del mismo es de 300 cm, su largo de 320 cm, una altura de 350 cm (sin la cúpula) y los muros tienen un espesor de 30 cm (Figura 2.1 b). Como fuente de combustible para la cocción utiliza fuel- oíl que es el petróleo pesado cubano, el cual es impulsado por una turbina desde 3 tanques o depósitos, los cuales

poseen una capacidad de 3000 litros cada uno; el consumo promedio de combustible es de 240 litros por cada 1000 ladrillos. Además, se necesita 3.5m<sup>3</sup>de arcilla por cada 1000 ladrillo; la misma es proveniente del yacimiento La Rúa situado a 2km del poblado de Agabama. En el mismo se registraron temperaturas en dos puntos de acceso, inferior y superior. A continuación, presentamos un cuadro resumen del consumo de materiales para una quema en un horno (Tabla 1.1), además del registro de temperaturas tomadas durante 10 horas (Fig. 2.2).La quema dura alrededor de 20 horas, llegando alcanzar temperaturas de hasta 876 °C en la parte inferior durante las primeras 10 horas.

Tabla 2.1: Consumo de materiales de un horno en una quema

| Para 10000 ladrillos |                     |
|----------------------|---------------------|
| Fuel-oíl             | 2400 litros         |
| leña                 | 12.5 m <sup>3</sup> |
| arcilla              | 35m <sup>3</sup>    |



Fig.2.1 a) Horno en Agabama

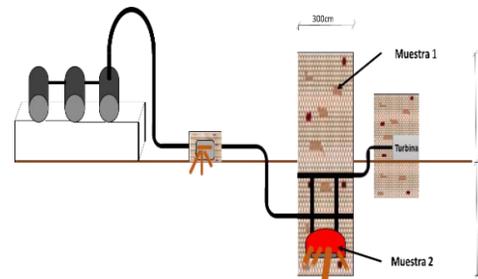
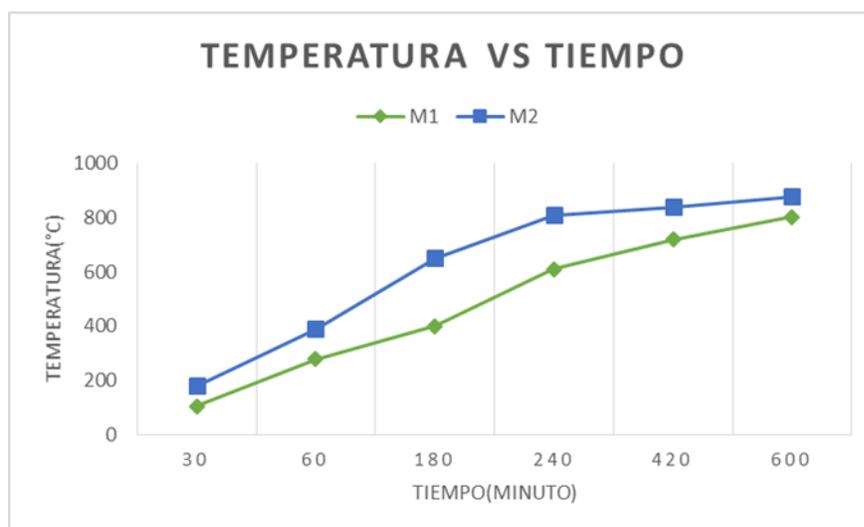


Fig.2.1b) Esquema del monitoreo de la T (°C)

### 2.3 Yacimiento de arcilla en el municipio de Fomento. Sancti Spíritus.

El área concesionada se localiza a 1.3 Km. al Norte del poblado de Agabama, por la carretera que va desde el mismo a Báez, en el Municipio de Fomento Provincia de Sancti Spíritus.

Fig. 2.2 Registro de Temperaturas



El área concesionada en este yacimiento se localiza en la hoja cartográfica 1:50 000 4282-III, Manicaragua cuyos vértices los conforman las coordenadas que se muestran en la tabla 2.2 Coordenadas del yacimiento, coordenadas Lambert, Sistema Cuba Norte: (Fig.2.3)

Tabla 2.2 Coordenadas del yacimiento

| <b>VERTICES</b> | <b>NORTE</b> | <b>ESTE</b> |
|-----------------|--------------|-------------|
| V-1             | 258 200      | 628 400     |
| V-2             | 258 200      | 628 600     |
| V-3             | 257 950      | 628 600     |
| V-4             | 257 950      | 628 400     |

El relieve de forma general es suave, con excepción de algunas colinas pequeñas dentro del mismo valle aluvial. La vegetación es típica de sabana y el área específica que no está en explotación del yacimiento está generalmente ocupada por cultivos varios.

La red hidrográfica está formada principalmente por el Río Guaracabuya, afluente del Río Agabama y una red algo densa de arroyos, cañadas y vaguadas.



Fig.2.3: Área concesionada en la escala 1:50000

El yacimiento presenta magnificas vías de comunicaciones, al área se puede acceder por la vía que enlaza al poblado de Fomento que también se comunica con la capital provincial Sancti Spíritus y cuenta además con numerosos caminos y terraplenes en buen estado. (Fig. 2.4)

El yacimiento tiene actualmente abiertos varios frentes de cantera dentro de los límites de la concesión, en el bloque B-1, las cuales continuarán su desarrollo, previéndose una extracción anual en el macizo (considerándose un 3% de pérdidas) de 1446 m<sup>3</sup> con un escalón de explotación de 2.50 m de arcilla muy plásticas. La materia prima es extraída durante los meses correspondientes al periodo de seca y almacenada en un depósito junto a la cantera para posteriormente ser trasladada por carretera hacía el tejar.

### 2.3.1 Geología.

La constitución geológica de la región es compleja y diversa, representada fundamentalmente por formaciones sedimentarias, vulcanógenas y vulcanógenas sedimentarias. Específicamente el yacimiento está compuesto por sedimentos arcillosos del Cuaternario, de origen aluvial depositados por el Río Guaracabuya, sobre rocas de la Formación Matagua (Cretácico Inferior).



Fig.2.4: Localización del yacimiento

En el corte en sentido general se observa la siguiente composición litológica (Fig. 2.5):

- Cubierta, formada por arcilla pardo oscura con restos vegetales, plástica.
- Arcilla muy plástica pardo carmelita, con concreciones de  $\text{CaCO}_3$  y pequeños fragmentos de rocas de composición polimícticas. El valor medio de los granos menor de 0.05 es de 71%.
- Arcilla plástica, color pardo carmelitoso de aspecto ligeramente arenoso, con fragmentos pequeños de composición polimícticas con bajo contenido de  $\text{CaCO}_3$ . El valor medio de los granos  $<0.05$  mm es de 54 %.
- Arcilla poco plástica de color carmelitoso, limpia con bajo contenido de  $\text{CaCO}_3$ .
- Arena Arcillosa de grano fino, principalmente en el área de la Exploración de Explotación.

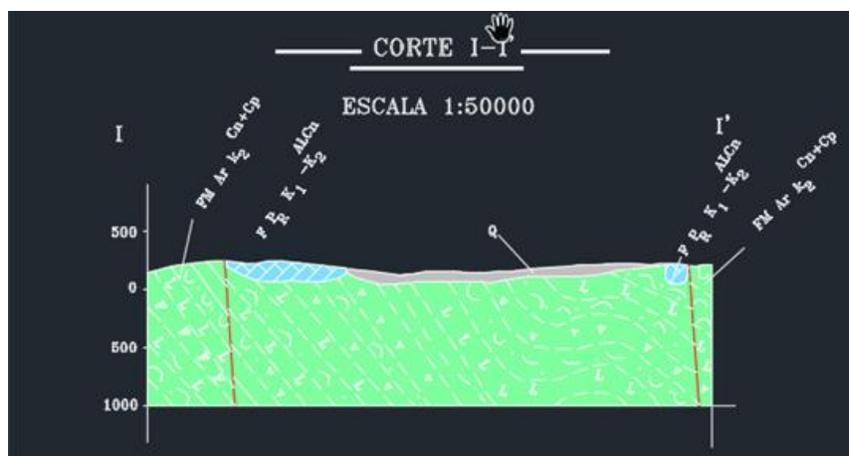


Fig.2.5: Perfil del yacimiento. Corte de la arcilla

### 2.3.2 Características tecnológicas.

Como resultados del estudio de las propiedades físico mecánicas se determinaron dos tipos tecnológicos de materia prima arcillosa en el yacimiento: la arcilla muy plástica y la arcilla plástica

La arcilla muy plástica, de color pardo amarillento, con esporádicos fragmentos mayores de 2 mm cuya cantidad no exceden el 5 %. Se presenta principalmente en la parte superior con potencias variables desde 0.60 hasta 2.80 m. Presentan de forma general granulometría entre 60 y 89 % por debajo del tamiz <0.05 mm.

El valor de la resistencia a la presión por flexión de esta arcilla, en estado seco es de 25-50 Kg/cm<sup>2</sup> y en estado horneado a 850°, 950° y a 1050° varía entre 40-90 Kg/cm<sup>2</sup> en las tres temperaturas. (Tabla 2.3 Características de las arcillas muy plásticas)

Tabla 2.3 Características de las arcillas muy plásticas

|   |             |
|---|-------------|
| El agua plástica oscila entre                                   | 25-40 %     |
| La contracción en estado seco                                   | 7.5-12.0 %  |
| Contracción en estado horneado a 850°                           | 7.4-13.5 %  |
| Contracción en estado horneado a 950°                           | 7.4-14.5 %  |
| Contracción en estado horneado a 1050°                          | 8.1-12.0 %  |
| Absorción a 850°  | 12.3-15.0 % |
| Absorción a 950°  | 12.0-15.0 % |
| Absorción a 1050°   | 8.0-12.0 %  |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 850°  | 40.0-90 %   |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 950°  | 40.0-90 %   |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 1050° | 40.0-90 %   |

La arcilla plástica. De color pardo amarillento, con esporádicos fragmentos principalmente de tobas, mayores de 2 mm que no sobrepasan en ningún caso el 5 %.

Se observa en la parte superior, por debajo de la cubierta y en otros casos por debajo de la arcilla muy plásticas. La potencia cortada es variable y va desde 0.70 hasta 2.20 m. Tiene continuidad en profundidad.

Presenta de forma general granulometría entre 46 y 62.20 % por debajo del tamiz <0.05 mm. (Tabla 2.4 Características de las arcillas plásticas)

### 2.3.3 Hidrogeología del yacimiento.

Durante las investigaciones geológicas en las diferentes etapas de estudio en el yacimiento, no se realizaron trabajos hidrogeológicos debido a que ningún pozo o laboreos efectuados cortaron el nivel de las aguas subterráneas. Para la evaluación del pronóstico de la afluencia de agua a la cantera, se tuvo presente el área concesionada de los bloques 4 BB, 1 y 11 C1B solamente:

- Área Total (F): 49993.52 m<sup>2</sup>.

- Precipitación promedio anuales (W) = 1522 mm/año = 1.522 m/año

-  $Q = F \times W$

$Q = 49993.52 \text{ m}^2 \times 1.522 \text{ m/año} = 76090 \text{ m}^3/\text{año}$

$Q = 211,36 \text{ m}^3/\text{día}$

Tabla.2.4 Características de las arcillas plásticas

|   |             |
|---|-------------|
| El agua plástica oscila entre                                   | 19-25 %     |
| La contracción en estado seco                                   | 4.7-7.0 %   |
| Contracción en estado horneado a 850°                           | 4.8-7.2 %   |
| Contracción en estado horneado a 950°                           | 4.6-7.4 %   |
| Contracción en estado horneado a 1050°                          | 7.8-12.8 %  |
| Absorción a 850°  | 15.0-18.3 % |
| Absorción a 950°  | 12.0-15.0 % |
| Absorción a 1050°   | 12.8-15.0 % |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 850°  | 40.0-90.0 % |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 950°  | 40.0-98.0 % |
| Resistencia a la presión por flexión en estado horneado a 1050° | 48.90 %     |

### 2.4 Fabricación del cemento LC<sup>3</sup> en Fomento

El trabajo experimental se desarrolló a escala de laboratorio y en la producción local, en el mismo se evaluaron morteros normalizados de cemento elaborados con LC<sup>3</sup> y para su

comparación se elaboraron morteros con cemento P-35 en probetas normalizadas de 16 x 4 x 4 cm, así como otros ensayos de interés para la investigación. Se realizaron ensayos de campo en la localidad de Agabama, Fomento pues allí es donde se obtiene el LC<sup>3</sup> así como los elementos prefabricados.

La elaboración local del LC<sup>3</sup> se realizó en el “Taller de Mantenimiento Constructivo” ubicado en el poblado de Agabama a 4 km del municipio de Fomento. Para la fabricación de este aglomerante se usó como adición residuos de ladrillo de barro y polvo de piedra. Los residuos de ladrillos utilizados provienen de la producción local en el Taller Artesanal “El Tejar” y presentan un alto contenido de arcilla y temperatura de cocción adecuada. El polvo de piedra es procedente de la cantera “Nieve Morejón” 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 asoleamiento 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 MB-600
3. Dosificación volumétrica de las proporciones de la adición puzolánica.
4. Carga del molino con los desechos de ladrillo y el polvo de piedra según la dosificación.
5. Molienda de ambos materiales por un tiempo de 2 horas y 30 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 LC<sup>3</sup> artesanal.
9. Almacenamiento del cemento LC<sup>3</sup> garantizando que no se humedezca ni contamine con otros materiales.

## 2.5 Implementación de ensayos de campos.

### 2.5.1 Dosificación de bolas de Acero

Con este ensayo se pretende determinar de forma empírica y en el menor tiempo posible, el número de bolas de acero necesarias para lograr la finura de molido planificada. Se preparó 50 kg de la materia primas, pues el molino posee una capacidad de 64 kg, para el mismo se tomó el Molino de bolas MB-600(Fig.2.6) de la bloquera de Agabama.



Fig.2.6 Molino de bolas MB-600

Para la realización de este ensayo se cargó el molino primeramente con el 25% de las bolas durante 45 minutos y se comprobó de forma práctica la finura del material y se apreció que no logró la finura deseada por lo que se decide aumentar la carga de bolas en un 50%,75% y 100% respectivamente, y comenzar nuevamente el proceso.

La cantidad de bolas recomendable es del 100% de las bolas debido al deterioro que posee tanto las bolas como el molino en general.

### 2.5.2 Tiempo de molienda

Para determinar el tiempo óptimo en el que se alcanza la finura adecuada para cada combinación de materias primas se preparó 50 kg de la materia prima a utilizar. Las materias primas a utilizar fueron la piedra caliza que primeramente se molió en una trituradora y el ladrillo que se molió en un molino industrial cerca de la localidad de Agabama para no esforzar al molino y así ganar en tiempo. Posteriormente se carga el molino y se procede a realizar la molienda del material. Esta es interrumpida a los 30 minutos, y luego a intervalo de 10 minutos. En cada interrupción se evalúa de forma práctica la finura del material molido

hasta que cumpla las especificaciones del LC3. Todo esto se puede apreciar en la Fig.2.7 a);b);c)y d).

### 2.5.3 Capacidad neta del molino y rendimiento

Se necesita estimar de forma empírica la cantidad máxima de materia prima a procesar en cada molienda y los volúmenes estimados de producción por molienda y por jornada. Una vez determinada la carga mínima de bolas se procede a calcular el volumen de cámara disponible:

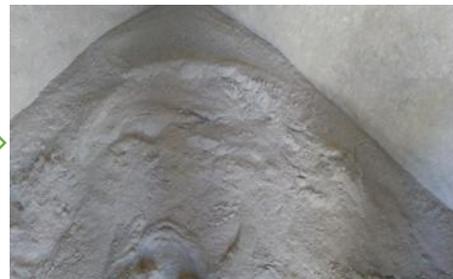
$$V_{disp} = V_{cam} - V_{bolas}$$

V disp.: Volúmenes posibles para la molienda

V cam: Volumen de la cámara= 120L

V bolas: Volumen ocupado por la masa de bolas dentro de la cámara

Conocidos el V disp. y los pesos unitarios de la puzolana, la cal y el LC3 (para proporción estándar puzolana/cal: 80%/20% en peso), se determina el volumen (o peso) por molienda. Con este dato y el del tiempo mínimo de molienda (según el procedimiento descrito), se puede entonces estimar el rendimiento de producción.



a) Fig. 2.7 Piedra caliza molida en la trituradora

b) Piedra caliza molida en el molino



c) Ladrillo molido en el molino industrial

d) Ladrillo molido en el molino de bolas

## 2.5.4 Consumo Energético

Para determinar el consumo energético que realiza el molino MB-600 se precisa leer en la identificación del moto-reductor del equipo las características del mismo (Tabla 2.5), y así poder determinar el consumo energético que realiza el molino de bolas durante todo el proceso. (Tabla 2.6)

Tabla 2.5: Características energéticas del molino de bolas MB-600

| V       | Hz | r/min | kw x hora | cos $\phi$ |
|---------|----|-------|-----------|------------|
| 200-240 | 50 | 1430  | 5.5       | 0,85       |
| 380-420 | 50 | 1430  | 5.5       | 0,85       |
| 440-480 | 60 | 1720  | 6.6       | 0,86       |

Tabla 2.6: Consumo Energético del molino de bolas MB-600

| Materias Primas | Cantidad (Kg) | Tiempo(horas:minut | KW    |
|-----------------|---------------|--------------------|-------|
| ladrillo(AAT)   | 50            | 2:30               | 13,75 |
| Piedra Caliza   | 50            | 1:30               | 8,25  |
| Total           | 100           | 4:00               | 22    |

## 2.5 Ensayos de Campo

### 2.5.1 Sedimentación

Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar el requerimiento de finura del LC<sup>3</sup> mediante la determinación de la velocidad de asentamiento de las partículas en agua. Es necesario tener una probeta de 250 ml de capacidad (Fig.2.8 a)) para esto se toma una muestra de 160ml de agua y 9g de LC<sup>3</sup> (Fig.2.8 b)), luego se agita con giros de hasta 180 grados por un tiempo de 10 segundos y se deja reposar de agua. A partir del estado de reposo se midieron los siguientes tiempos:

t<sub>1</sub>. tiempo para el que turbiedad alcanza la altura de 80 mm.

t<sub>2</sub>. tiempo en que la altura marca 30 mm.

t<sub>3</sub>. tiempo en la que la mezcla se aclara totalmente.



Fig.2.8a) Probeta de 250 ml



Fig.2.8 b) Balanza digital YP 5001

El material alcanza los requisitos de finura si:  $t_1 > 3$  minutos, y el  $t_2 > 5$  minutos

### 2.5.2 Ensayo visual-táctil LC<sup>3</sup>

Este ensayo se realizó para evaluar las características de las puzolanas mediante la observación directa y la percepción al tacto de las partículas de la muestra. Para eso obtuvo 250 ml del LC<sup>3</sup> almacenado en el taller de producción y 250 ml de cemento portland industrial, dónde se palpa con las manos ambos cementos (Fig.2.9)



Fig.2.9: Ensayo visual-táctil

### 2.5.3 Ensayo de la Huella

El ensayo de la huella permite evaluar la velocidad de fraguado de una pasta de cemento usando el criterio del cambio de consistencia, a partir de la huella que deja el impacto de una bola de acero en la superficie de esta, para el mismo se necesitó una bola de acero de 25mm y un aro de 100mm de diámetro y 25mm de altura; para el cual se preparó una pasta con 400g de LC<sup>3</sup> y 120ml de agua. Posteriormente se dejó caer la bola a una altura de 25 cm a las 5 y 20 horas después de elaborada la pasta donde se midió el diámetro de la huella (Fig.2.10)



Fig.2.10 Ensayo de la huella

$$Dif(\%) = \frac{\text{diam Inicial} - \text{diam Final}}{\text{diam inicial}} \times 100$$

Diam Inicial: diámetro de la huella a las 5 horas

Diam Final: diámetro de la huella a las 20 horas

#### 2.5.4 Hidraulicidad

Para un estudio profundo de cualquier tipo de cemento es necesario evaluar de forma aproximada el carácter hidráulico de la pasta. Para lograr lo dicho se realiza una pasta de cemento con 120ml de agua y 440g del aglomerante, de tal manera que permitan elaborar el número de esferas necesarias para el ensayo (3 Bolas). Luego se deja reposar durante 1 hora en un ambiente húmedo y se deposita en un recipiente con agua de forma tal que el agua cubra totalmente las esferas (Fig.2.11 a)), las cuales serán extraídas a las 24 horas (Fig.2.11 b)).



Fig.2.11 a) Esfera sumergidas en aguas



Fig.2.1 b) Comprobación de las durezas

#### 2.5.5 Humedad natural en arcillas calcinadas

Es necesario evaluar de forma aproximada el contenido humedad en la arcilla calcinada molida. Para eso se selecciona una cantidad de 1kg de la arcilla calcinada molida que se va

a usar y se aplica el siguiente procedimiento. (Manual de Calidad para cemento de bajo carbono, 2015)

- I. Se toma una porción de arcilla calcinada molida con la mano y se cierra el puño tratando de que no escaque.
- II. Con el brazo estirado, abra la mano.

Si al abrir el puño el material escapa entre los dedos, el contenido de humedad de la arcilla calcinada molida es permisible. Si, por el contrario, el material presenta signos de aglomeración, no resulta adecuado para su molienda

### 2.6 Ensayos de Laboratorio:

#### 2.6.1 Reactividad de la arcilla original

Para evaluar las propiedades puzolánica de las muestras de arcillas proveniente del yacimiento se toma una muestra representativa de la arcilla natural que fue usada en la producción de ladrillos cuyos residuos se usan en la producción de LC<sup>3</sup>, y se somete a elevadas temperatura. Se pesa una porción de 100 g del material, el cual es colocado en un recipiente de cerámicas o acero inoxidable (crisol) (Fig. 2.12 a), el que también es pesado previamente. Después se le realiza un precalentamiento a 200 °C por 30 minutos, luego se extrae el material y se coloca en un recipiente de enfriamiento; enfriada la arcilla se pesa, luego se vuelve a colocar en la mufla y se sube el termostato de la mufla Model STRJX5-11(Fig.2.12 b)) hasta los grados requeridos (en este caso hasta temperaturas de 350, 650 y 850 °C) con un tiempo de residencia igual a una hora. Así se puede determinar el % de caolín equivalente el cual confiere en qué estado se encuentra la arcilla.



Fig.2.12 a) Crisol con 100g de arcilla



Fig.2.12 b) Arcilla calcinada a 850 °C

### 2.6.2 Peso unitario de las materias primas

El peso unitario es la relación entre el peso de una cantidad de material que se desea ensayar y el volumen ocupado por el mismo. Esto se calcula a partir de la Norma ASTM 29-55T y sirve para establecer relaciones entre volúmenes y pesos del material de estudio. El peso unitario se determina por medio de la pesada del material contenido en recipiente de volumen conocido (Fig.2.13), es decir:

$$Pu = m \times FC$$

Pu: peso unitario

m: masa del material

FC: factor de calibración = 0.2058

El procedimiento para la realización de este ensayo es el siguiente:

1. Se toma un recipiente con volumen conocido (5 L) y se tara
2. Se llena el recipiente del material de estudio, en este caso caliza y arcilla
3. Luego se pesa nuevamente y se aplica la fórmula del Peso unitario (Pu)

El valor de peso unitario obtenido se utilizará para efectuar transformaciones de peso a volumen y viceversa, necesarios para cálculo de las dosificaciones y transportación del material.



Fig.2.13 Materias primas en la balanza digital

### 2.6.3 Granulometría

Este ensayo brinda la posibilidad de conocer la distribución de tamaño de partículas del material en estudio. Se realiza a partir de la Norma ASTM C 136, consiste en hacer pasar el material previamente secado a peso constante, a través de tamices con diferentes aberturas

de malla, ordenados de mayor a menor. En cada uno quedara retenida aquellas partículas de menor diámetro, pero a la vez menores que la abertura de malla de tamiz superior. Para esto se tomaron tamices con diferentes aberturas de malla: tamiz No. 4 (4.76 mm); tamiz No.170 (0,09 mm), (según la Norma Cubana), pues este es el que determina la finura de cualquier tipo de cemento, además del tamiz de 0,045 mm. Si el 90 % o más de las partículas atraviesa el tamiz No. 4 (4.76 mm), se considera aceptable la arcilla calcinada molida o caliza.

### **2.6.4 Finura de molido**

Es necesario determinar la finura de molido del LC<sup>3</sup> a partir del material retenido en el tamiz especificado. Para este fin cada norma establece un tamiz por lo que debe pasarse la muestra del cemento a estudiar, haciendo las pesadas de forma consecutiva hasta que la diferencia entre ellas sea menor del 0.1%.Este ensayo complementa los resultados de superficie específica para evaluar la proporción de partículas gruesas en el cemento. El LC<sup>3</sup> cumple con el requisito de finura cuando se verifica que los porcentos retenidos son menores que los previstos en la norma cubana NC 980-2013 Finura de molido

### **2.6.5 Consistencia Normal**

Para la realización de este ensayo es necesario seguir correctamente el siguiente procedimiento según NC 524:2015

1. Preparación de la pasta de cemento
  - a) Poner toda el agua en el recipiente
  - b) Añadir 650 g de cemento en el agua (dejar por 30´´)
  - c) Encender la amasadora a V lenta por 30 ´´
  - d) Detener la amasadora por 15´´ y limpiar bordes
  - e) Mezclar con V rápida por 1 minuto
2. Tomar porción de mezcla, hacer bola y lanzar 6 veces
3. Colocación de la pasta de cemento en el cono.
4. Colocar el conjunto bajo la aguja Vicat, fijar la «aguja» tocando la superficie. Hacer lectura inicial.
5. Liberar la aguja y efectuar lectura luego de 30´´

El instrumento para la realización de este ensayo es de gran precisión, el mismo está compuesto de elementos de acero inoxidable para prevenir la corrosión y falta de fidelidad en las mediciones ver Figura 2. 14



Fig.2.14 Ensayo de consistencia normal

### 2.6.6 Tiempo de Fraguado

Para este ensayo es necesario determinar el tiempo de fraguado inicial y final de una pasta de consistencia normal. El tiempo de fraguado inicial es el transcurrido desde que se elabora la pasta, hasta el momento en que sea posible moldearla con relativa facilidad, sin que se altere considerablemente sus propiedades físicas y químicas, el tiempo de fraguado final es el que media desde la elaboración de la pasta hasta que, debido a las reacciones de hidratación, adquiera la consistencia de un material sólido. Se usará ensayo de Vicat según la norma ASTM C19 (Fig.15). Para esto es necesario realizar el siguiente procedimiento:

- 1- Mezclar según procedimiento descrito antes, 650 g de cemento con la cantidad de agua de la consistencia normal.
- 2- Moldear la muestra en el cono y mantener en ambiente húmedo por 30´.
- 3- Medir la penetración de la aguja de 1 mm a partir de ese instante y cada 15 minutos, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos.
- 4- Haga todas las anotaciones, y por interpolación obtenga el tiempo de fraguado inicial
- 5- El tiempo de fraguado final es cuando la aguja no se hunde visiblemente en la pasta.



Fig.2.15 Tiempo de Fraguados mediante la aguja de Vicat

### 2.7 Proceso de fabricación de los morteros:

Para la elaboración de las probetas se limpiaron, engrasaron y armaron los moldes a utilizar según las especificaciones de la norma NC 173:2002 (Fig. 2.16 a)). Para esto se realizaron dos dosificaciones, (Tabla 2.7). Se mezcló el agua, cemento y arena normalizada y se vertió el material para formar una primera capa que se compactó en toda su superficie con 25 golpes suaves y homogéneos. Después se vertió el resto del material y se repitió la operación de apisonado. Luego se eliminaron los espacios vacíos que quedaron en la superficie de los tres compartimentos. Cuando el mortero comenzó a endurecer, se enrasó el molde con una superficie metálica. Después de 72 horas de elaboradas las probetas se desmoldaron, se marcaron y se colocaron en la piscina de curado (Fig.2.16 b)). Para cada muestra se fabricó 1 molde de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm las cuales se ensayaron a los 28 días a flexo-compresión y compresión respectivamente.

Tabla 2.7: Dosificaciones de las mezclas

| <b>Materiales</b> | <b>M 1</b> | <b>M 2</b> |
|-------------------|------------|------------|
| Agua              | 225ml      | 225ml      |
| Cemento P - 35    | 450g       | 315g       |
| Cemento LC3(30%)  |            | 135g       |
| Arena Normalizada | 1350g      | 1350g      |



Fig.2.16 a) Moldes de las probetas



Fig.2.16 b) Probetas sumergidas en agua

### 2.7.1 Resistencia a Compresión de las probetas

Este ensayo permite determinar la capacidad aglomerante del cemento LC<sup>3</sup>, por medio de la resistencia a la compresión de un mortero normalizado elaborado con este material. La evaluación se debe realizar sobre morteros preparados con arena normalizada, en una proporción en peso (aglomerante: arena) de 1:3, y una cantidad de agua tal que proporcione una fluidez de 80 a 90 mm. Las probetas deben permanecer en sus moldes durante tres días, cubiertas con un vidrio. Después se desmoldarán y se sumergirán en agua potable, a una temperatura de  $25 \pm 5$  °C, hasta la fecha de la rotura. Este ensayo se debe realizar de acuerdo al procedimiento de la norma cubana NC 96: 2001. Estas fueron sometidas a compresión en la prensa del laboratorio Caenao BCCCP (1975) (Fig.2.17). La resistencia a compresión del aglomerante LC<sup>3</sup> a los 28 días, de acuerdo con la NC 96: 2001, deberá ser igual o mayor a 25 MPa.



Fig.2.17 Ensayo a compresión

### 2.7.2 Resistencia Mecánica

Para evaluar el criterio de resistencia mecánica o flexo tracción de probetas del mortero elaborado con las diferentes dosificaciones es necesario seguir la siguiente secuencia de pasos:

1. Elaborar un mortero con los materiales previamente seleccionados, hasta lograr la máxima homogeneidad
2. Llenar los moldes, garantizando una correcta colocación y compactación.
3. Colocar los moldes a curar en un ambiente húmedo y aislado del aire.
4. Desmoldear las probetas a las 72 horas, y sumergirlas en agua hasta los 28 días.
5. Extraer la muestra a ensayar cuatro horas antes del momento del ensayo.
6. Colocar la muestra en el aparato de ensayo, observando que la posición de los ensayos sea correcta
7. Aplicar la carga vertiendo agua en el recipiente, preferiblemente con una manguera fina para lograr una velocidad constante de aplicación de la carga.
8. Al romper la briqueta, leer en la escala ubicada en el recipiente calibrado la carga de rotura.(Fig.2.18)

El espécimen fabricado debe ser capaz de resistir como mínimo una fuerza  $P=80$  KN aproximadamente, aplicada en su punto medio a los 28 días



Fig.2.18 Ensayo a flexo – tracción

## 2.8. Elementos prefabricados. Proceso de fabricación de los bloques huecos de hormigón

La fabricación de los bloques se realizó en el “Taller de Mantenimiento Constructivo” ubicado en el poblado de Agabama que se encuentra a 4 km del municipio de Fomento, provincia Sancti Spíritus. La producción de los bloques se hizo con la maquina Vibrocompactadora de procedencia china, marca Jinly modelo QTJ4-45 (Fig.2.19) 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 dos series de bloques, una de ellas con el cemento P-35, para obtener resultados de los que se hacen allí y la otra sustituyendo el cemento P-35 por el cemento LC<sup>3</sup>elaborado en dicho taller. 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:



Fig.2.19 Máquina Vibrocompactadora marca Jinly modelo QTJ4-45

### ✓ Dosificación de la mezcla

El diseño de la mezcla de hormigón para bloques que se usó en ambas series fue la misma que se utiliza en el taller. El diseño del hormigón se concibió para producir 12 bloques de 10 cm de ancho para cada serie, como se muestra en la Tabla 2.8.

### ✓ Medición de los materiales componentes de la mezcla

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

Tabla 2.8: Dosificación de las mezclas para bloques 10 con ambos cementos

| <b>Materiales</b> | <b>Dosificación con ambos cementos</b> | <b>Índice de consumo para cada bloque</b> |
|-------------------|--|---|
| cimento           | 12,83kg                                | 1,07kg                                    |
| polvo de piedra   | 45kg                                   | 3,75kg                                    |
| piedra            | 67,4kg                                 | 5,61kg                                    |
| Agua              | 5,13kg                                 | 0,42kg                                    |
| Relación a/c=0.40 |  |   |

### ✓ **Mezclado de los materiales.**

La preparación de los materiales se realizó con el equipo de procedencia china JW 250 marca Libo, Figura 2.20, diseñada para el mezclado y homogenizado de los materiales, con el objetivo de facilitar el trabajo y proporcionar una mezcla más uniforme.



Fig.2.20 Mezcladora horizontal.

### ✓ **Carga de la máquina bloquera**

Una vez terminado el mezclado de los materiales, se vertió el hormigón en el suelo cerca de la máquina, posteriormente se inició la vibración y a su vez la carga del carro distribuidor con palas de forma continua, verificando el llenado total de 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 se procedió a la extracción de los bloques con la carretilla suministrada al efecto. 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

Un obrero tomó el pallet con los bloques de la máquina en la carretilla y lo trasladó 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, estos tienen la resistencia adecuada cierta 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.

### 2.8.1 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 dos lotes fabricados y el número de bloques por muestra fue de 10, luego se realizaron los ensayos de dimensiones, de resistencia a compresión y de absorción.

Tabla 2.9 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

### 2.8.2 Ensayo de dimensiones

El ensayo para verificar las dimensiones de los bloques se realiza según lo establecido en la NC 247-2010, se hacen la cantidad de mediciones establecidas promediando los resultados, el criterio de evaluación o conformidad se realiza en relación con los valores que se muestran en la tabla 2.10 y tabla 2.11:

**Tabla 2.10: Dimensiones principales y tolerancias admisibles de los bloques tipo III**

| <b>Dimensiones</b> | <b>Nominales(mm)</b> | <b>Fabricación(mm)</b> |
|--------------------|----------------------|------------------------|
| <b>Ancho</b>       | 100                  | 95 ± 3mm               |
| <b>Altura</b>      | 200                  | 195 ± 3mm              |
| <b>Longitud</b>    | 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.

Todos los resultados obtenidos en cada una de las mediciones para ambos bloques se pueden observar en el anexo 1.

Tabla 2.11: Mediciones que se le hacen a cada bloque

| <b>Dimensiones.</b>  | <b>Procedimiento de medición.</b>   |
|--|---|
| <b>Longitud</b>  | 4 mediciones en las cabezas.  |
| <b>Ancho</b>   | 6 mediciones, 3 puntos por la cara superior y 3 puntos por la cara inferior.  |
| <b>Altura</b>  | 6 mediciones en 3 puntos en cada lateral.   |
| <b>Grosor de las paredes en la parte superior y en la base del bloque.</b> | 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 1 de la NC 247-2010

### 2.8.3 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. El mismo se realizó en la Empresa de Tubos en Materias Primas en el municipio de Santa Clara, el personal para la realización de estos ensayos es altamente calificado. Los resultados de los mismos se pueden observar en el anexo1



Fig.2.21 Ensayo a compresión del bloque fabricado con LC<sup>3</sup>

### 2.8.4 Ensayo de absorción

El ensayo de absorción se realiza con el objetivo de establecer 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. Aclarar que la norma cubana vigente establece que los bloques 10 no se le hacen absorción de agua, pero se decidió realizarlo para tener criterio sobre la influencia que puede tener en la elaboración de estos elementos la adición de AAT.

Para la realización de este ensayo se aplica el siguiente procedimiento. Primeramente, se colocaron los bloques en la estufa a una temperatura de 105°C ~ 110°C (Fig.2.22 a)) 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 (Fig.2.22 b)). Después de cumplido el tiempo se extrajo los bloques, se eliminó el agua superficial y se pesaron en la balanza, determinándose así la masa húmeda. (Ver resultados anexo 1)



Fig.2.22a) Bloque secado a 110 °C



Fig.2.22 b) Bloques sumergidos en agua

## 2.9. Vigas, plaquetas, losa de pisos y hexagonales de hormigón.

En el “Taller de Mantenimiento Constructivo” de Agabama, además de bloques se fabrican elementos como: plaquetas de 48 cm de ancho x 58 cm de largo x 4.5 cm de altura; losas hexagonales según los moldes que existen en el taller, baldosas cuadradas de 50 x 50 mm y 25 x 25 mm y viga de perfil trapezoidal con 70 mm en la parte superior y 50 mm en la inferior y peralte de 150 mm, tal y como se muestra en el anexo 2. Para la realización de los elementos se hizo un hormigón con una resistencia de 20MPa, la dosificación a emplear para todos los elementos se muestran en la Tabla 2.12

Tabla 2.12: Dosificación de los elementos prefabricados

| Materiales      | Plaqueta | Baldosas  | Vigueta  | Losa hexagonal |
|-----------------|----------|-----------|----------|----------------|
| Cemento LC3     | 12,83 Kg | 2,01 Kg   | 13,82 Kg | 3,27 Kg        |
| Polvo de piedra | 30 Kg    | 4,671 Kg  | 32,32 Kg | 6,1 Kg         |
| Piedra          | 40,44 Kg | 6,2936 Kg | 43,57 Kg | 7,5 Kg         |
| Agua            | 6,40 Kg  | 1,005 Kg  | 6,91 Kg  | 1,635 Kg       |
| Relación a/c    | 0,5      | 0,5       | 0,5      | 0,5            |

### 2.9.1 Probetas de hormigón para 20 MPa

La fabricación de las probetas se llevó a cabo en los laboratorios de la Facultad de Construcciones en la UCLV. Se fabricaron 12 probetas, 6 con el cemento P-35 y 6 con el LC<sup>3</sup> de Fomento. El diseño de la mezcla de hormigón se hizo para 10 litros, que es el volumen aproximado de 6 probetas de forma cilíndrica de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura. (Tabla 2.13) El asentamiento obtenido después de elaborada la mezcla en la hormigonera fue de 1 cm para el hormigón producido con el cemento P-35 y 4.5 cm con el LC<sup>3</sup> de Fomento. (Fig.2.23)

Tabla 2.13: Dosificación de las probetas de hormigón

|                 | <b>Para 10 L de hormigón de 20 Mpa</b>       |
|-----------------|--|
| Materiales      | Dosificación para 6 probetas de hormigón(Kg) |
| Cemento         | 6,415  |
| Arena del Purio | 15   |
| Agua            | 3,21   |
| Relación a/c    | 0,5  |

Para la confección de las probetas primeramente se cubrió la superficie interna del molde con 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.



Fig.2.24 Medición del asentamiento



Fig.2.25 Llenado de los moldes

### 2.10 Conclusiones Parciales

- Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la investigación, se controlaron los parámetros de obtención de las materias primas para la fabricación del cemento LC<sup>3</sup>, y con ello producir bloques huecos y hormigón de 20 MPa para la fabricación de otros elementos de pequeño formato como plaquetas, vigas, losas hexagonales y baldosas. vinculados al programa nacional de producción local y ventas de materiales.
- Durante el proceso de obtención a pequeña escala del cemento LC<sup>3</sup> producido en Fomento, se hace difícil lograr la finura de las materias primas en un tiempo óptimo (caliza y arcilla) debido a que las condiciones que presenta el molino de bolas no son favorables.
- Las características del cemento producido a pequeña escala se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio y ensayos de campo evaluando parámetros como: finura de molido, tiempos de fraguado, hidraulicidad y resistencia a compresión.

- A los bloques elaborados a partir del cemento artesanal se le realizaron los ensayos de dimensiones, resistencia a compresión y absorción establecida en la NC 247-2010, mientras que a al hormigón se le determinó la resistencia a compresión según lo establece la NC 274-2009.

## **Capítulo III: Evaluación del comportamiento del cemento de bajo carbono producido, así como los elementos obtenidos en la localidad de Agabama, Fomento**

### **3.1 Generalidades**

En este capítulo se exponen y se hace un análisis de los resultados de los ensayos realizados al cemento LC<sup>3</sup> fabricado en el municipio de Fomento. 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 el cemento de producción local y el P-35 tomándolo como referencia. También se muestran los resultados del horno al que es sometida la arcilla en su proceso de transformación en AAT para la obtención del LC<sup>3</sup>. Así se realiza un análisis económico de todo el proceso para la realización de dicho cemento y de los elementos prefabricados.

### **3.2 Análisis de los resultados de los ensayos realizados en la producción local**

En la localidad de Agabama, municipio de Fomento se llevaron a cabo una serie de investigaciones para la obtención del LC<sup>3</sup> y elementos prefabricados a partir de las materias primas existente en la localidad. Se midieron las temperaturas a que es sometida la arcilla en su proceso de transformación para la obtención del LC<sup>2</sup> y posteriormente su conversión en el LC<sup>3</sup>.

La quema de los hornos de ladrillos dura alrededor de 20 horas alcanzando temperaturas de hasta 876 (°C), suficiente para lograr la obtención de objetos cerámicos (ladrillos) que cumplen con los estándares establecidos (color, resistencia y absorción). Estos desechos cerámico pasan primeramente por un molino industrial para lograr aprovechar el tiempo, debido a que el molino no está al 100% de su rendimiento y la piedra caliza es triturada previamente. Después ambas materias primas son molidas en el molino de bolas MB-600 del Taller de Mantenimiento en esa misma localidad en el que hay que utilizar el 100% de las bolas para que la AAT y la piedra caliza cumpla con los requisitos de finura establecidos en el Manual de Calidad, así se tomó el tiempo que demora cada materia

prima en alcanzar la finura exigida y el consumo energético del molino de bolas, así como la capacidad neta del mismo; lo anterior explicado se puede apreciar en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Molino MB-600

| Materias Primas | Cantidad (Kg) | Tiempo(horas:minut | KW    |
|-----------------|---------------|--------------------|-------|
| ladrillo(AAT)   | 50            | 2:30               | 13,75 |
| Piedra Caliza   | 50            | 1:30               | 8,25  |
| Total           | 100           | 4:00               | 22    |

### 3.2.1 Sedimentación

Este ensayo se le realizó al cemento LC<sup>3</sup> de Fomento 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 Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados del ensayo de sedimentación

| Tiempos(min) | LC3   | P-35 |
|--------------|-------|------|
| t1           | 4:46  | 3:01 |
| t2           | 6:06  | 5:04 |
| t3           | 12:09 | 9:08 |

Según los tiempos obtenidos para cada uno de los cementos se puede observar como el cemento LC<sup>3</sup> producido en el municipio de Fomento 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. Como se puede apreciar para los tres cementos los tiempos t1 son mayores que 3 minutos y los t2 son mayores que 5 minutos, por lo que según el “Manual de Calidad para el cemento de bajo carbono LC<sup>3</sup>” realizado en el CIDEM cumplen los requisitos de finura para dicho cementos, para observar los resultados de una forma más detallada se pueden apreciar en un gráfico de barra.

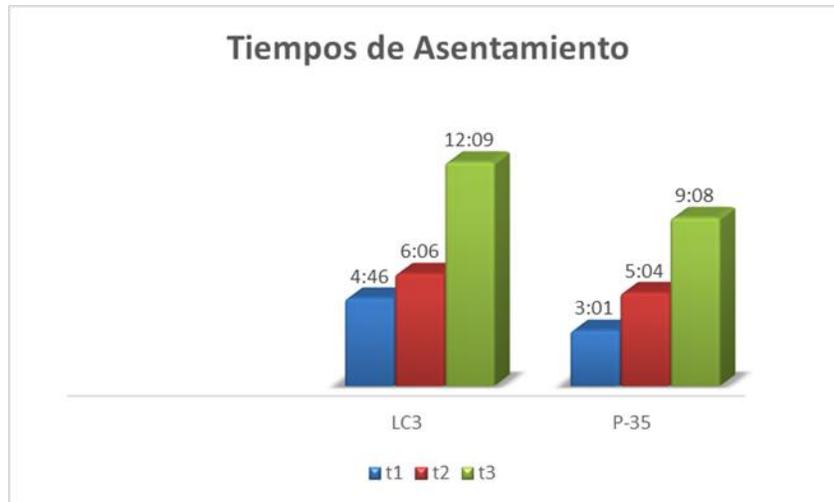


Fig. 3.1: Gráfico de los tiempos de Asentamientos

### 3.2.2 Ensayo visual-táctil

En la comparación del cemento LC<sup>3</sup> de producción local con el cemento P-35, al palpar ambas muestras con las manos, se puede notar que las partículas del LC<sup>3</sup> son imperceptibles al tacto, pero al mismo tiempo no existen grandes diferencias en la finura entre un cemento y otro, por lo que presupone una buena finura de molido

### 3.2.3 Ensayo de la huella

Este ensayo se le realizó al cemento LC<sup>3</sup> de producción local en el municipio de Fomento y a una muestra de cemento P-35 como muestra patrón. Se midieron dos veces, primero a las 5 horas de realizada la pasta y luego a las 20 horas y se midieron los diámetros de la huella originados por la bola de acero, 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 3.2.

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.

### 3.2.4 Hidraulicidad

Tanto en el cemento LC<sup>3</sup> de Fomento como en el P-35 como muestra patrón, 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.



Fig.3.2: Gráfico de la huella

### 3.2.5 Humedad natural en arcilla calcinada

La humedad natural tanto en la arcilla calcinada como la del polvo de piedra caliza son determinante en su proceso de transformación para la obtención del cemento LC<sup>3</sup>. Estas tienen que estar totalmente seca; primeramente, en su estado natural para que puedan ser molida con facilidad en los respectivos equipos de molienda y así poder ser homogenizadas totalmente para así lograr un correcto aglomerante. Para comprobar si realmente las materias primas cumplen con los requisitos de humedad natural, se dejó la mano estirada y se cerró el puño, al abrir la mano ambas salieron con facilidad entre los dedos por lo que se puede apreciar que el contenido de humedad tanto de la caliza como de la arcilla calcinada molida es permisible al no contar con signos de aglomeración.

### 3.2.6 Reactividad de la arcilla original

Como se señaló anteriormente las arcillas fueron sometidas a tratamiento térmico y tratamiento mecánico para lograr modificar su estructura y reducir su granulometría, el objetivo es modelar las condiciones reales en que se obtienen los DC, sin pretender

optimizar este proceso para obtener la mejor temperatura o mejor régimen de tratamiento termo – mecánico. En ese sentido las arcillas se calcinaron en una mufla eléctrica a varias temperaturas para determinar el %K y posteriormente el % Keq para eso se sometieron hasta 850° C tal y como se muestra en la tabla 3.3

Tabla 3.3: Resultados del peso de la arcilla sometida a diferentes temperaturas

| PESO MUESTRA | 200 °C | 350 °C | 650 °C | 850 °C | % K        | % Keq.    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|------------|-----------|
| 100          | 94,6   | 92,6   | 90,1   | 89,5   | 18,9305597 | 23,473894 |

Como %Keq = 23, 47 está por debajo del 40% expuesto en el Manual de Calidad para cemento de bajo carbono. Entonces se considera que el material no está apto para su utilización como puzolanas, pero a pesar de todo la AAT producida a partir de desechos cerámicos elaborados con dicha arcilla cumple con los requisitos de finura. Además, se puede observar que los bloques hechos con el LC<sup>3</sup> están por encima de lo establecido en la norma.

### 3.2.7 Peso unitario de las materias primas

En este ensayo se aprecia el peso que posee cada materia prima al ser molida finamente para su conversión en cemento. Se calculó el peso unitario suelto de cada una y se llegó a los siguientes resultados (Tabla 3.4). Se pesó cada material 3 veces y después se promediaron los resultados, los cuales dieron que la AAT pesa ligeramente más que la piedra caliza, los mismos se puede observar en la (Fig. 3.3). Hay que destacar que el valor del peso unitario obtenido se utiliza para efectuar transformaciones de peso a volumen y viceversa, necesarios para el cálculo de las dosificaciones y transportación del material.

Tabla 3.4: Peso Unitario de las Materias Primas

| Peso Unitario de las Materias Primas (g) |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|
|  | 1ro     | 2do     | 3ro     | Prom    |
| AAT                                      | 945,218 | 961,106 | 951,125 | 952,483 |
| Caliza                                   | 893,295 | 921,058 | 908,21  | 907,521 |

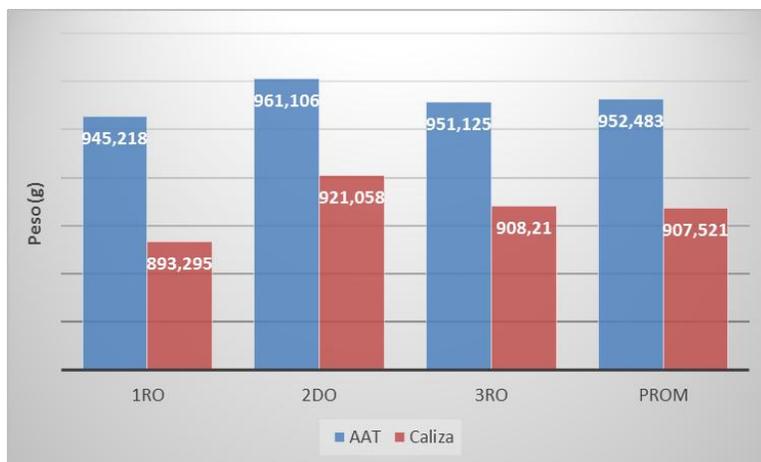


Fig.3.3: Peso de cada materia prima

### 3.2.8 Granulometría

Se realizó la granulometría pues nos da la posibilidad de conocer la distribución de tamaño de las partículas del material en estudio. Para ello se tomó 500 g de las materias primas en estudio y se tomaron los tamices de 4.76 mm; 0.09 mm y 0.045 mm respectivamente como se muestra a continuación.

Tabla 3.4: % que pasa por cada tamiz

|               | (% que Pasa) |       |       |
|---------------|--------------|-------|-------|
|               | Tamices (mm) |       |       |
|               | 4,76         | 0,09  | 0,045 |
| <b>AAT</b>    | 100          | 74,62 | 51,44 |
| <b>Caliza</b> | 99,8         | 57,98 | 43,51 |

Se puede observar que ambas materias primas pasan más del 90% por el tamiz de 4.76 mm por lo que se considera aceptable la arcilla calcinada y la caliza. Al realizar la operación por los otros dos tamices se puede apreciar que en la arcilla calcinada el % de pasado es superior al de la caliza, pues esta alcanzó mejor finura en la molienda. Lo anterior expuesto se puede observar en un gráfico de barra. (Fig.3.4)

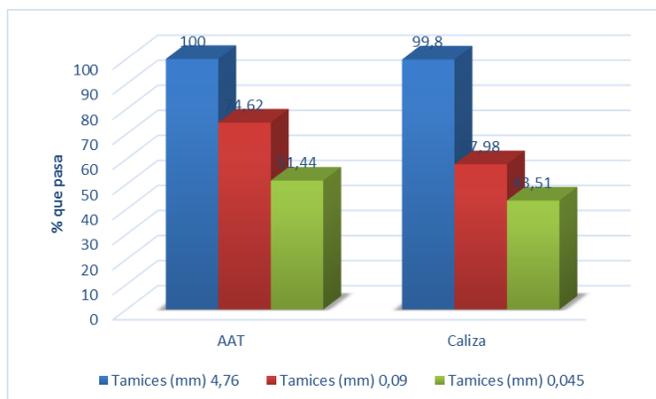


Fig.3.4:% que pasa las materias primas por cada tamiz

### 3.2.9 Finura de molido

El ensayo de finura con el método del tamizado se le realizó al cemento LC<sup>3</sup> de Fomento 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 3.6

Como se puede observar en la Figura 3.4 tanto la muestra patrón de cemento P-35 como el cemento LC<sup>3</sup> de Fomento cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001, ya que en todos los casos el % Retenido en el Tamiz de 90µm es menor que el 10%.

Tabla 3.5: Resultado del ensayo de finura con el método del tamizado

| Tipo de Cemento        | % Retenido en el tamiz de 90 µm |
|------------------------|---------------------------------|
| Cemento LC3 de Fomento | 9,9                             |
| Cemento P-35           | 6,5                             |

Como se puede observar en la Tabla 3.6 tanto la muestra patrón de cemento P-35 como el cemento LC<sup>3</sup> de Fomento cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001, ya que en todos los casos el % Retenido en el Tamiz de 90µm es menor que el 10%. A continuación, se presenta un gráfico donde se puede apreciar el % de retenido.

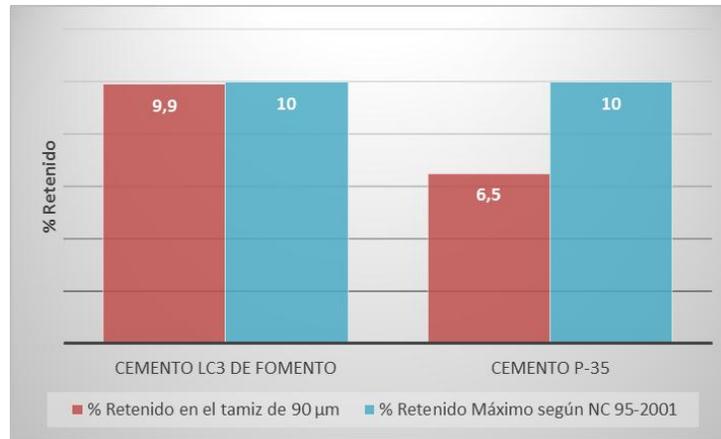


Fig.3.5: Comportamiento de la finura para cada cemento

### 3.2.10 Consistencia normal y Tiempo de fraguado

Los resultados de consistencia normal (%) evidencian que el cemento LC<sup>3</sup> con un 27 % posee una mayor demanda de agua que el P-35 logrando este último un 23 % de absorción de agua. Esta diferencia entre ambos cementos es producto de los procesos de molienda y de superficie específica que poseen. Esta demanda de agua trae consigo el aumento de la porosidad que podría reducirse con el tiempo producto de la reacción del HC con la alúmina y la sílice aportada por la arcilla calcinada y también el aumento de la resistencia a compresión, y estos a su vez traen consigo la reducción del tamaño de los poros capilares y la interconexión de estos, debido a la formación de SCH adicional de la reacción puzolánica, facilitando así mayor impermeabilidad.

Mientras que los tiempos de fraguados calculados para ambos cementantes según la NC 524:2015 y tomando como valores de orientación las especificaciones para mezclas cal-puzolanas de la norma india IS 4098, que exige que los tiempos de fraguado inicial y final sean menores que 2 y 24 horas respectivamente, según lo planteado en el Manual de Calidad para cementos de bajo carbono. Ambos cementos cumplen con las especificaciones antes dichas. El gráfico siguiente muestra los valores de penetración de la aguja de Vicat cada 15min después de haber transcurrido 30 min de haber enrasado en reposo la pasta de cemento, mientras que la tabla 3.6 muestra los resultados del tiempo inicial y final de ambos aglomerantes.



Fig.3.6 Comportamiento del fraguado de cada cemento

Tabla 3.6: Tiempos de fraguado inicial final

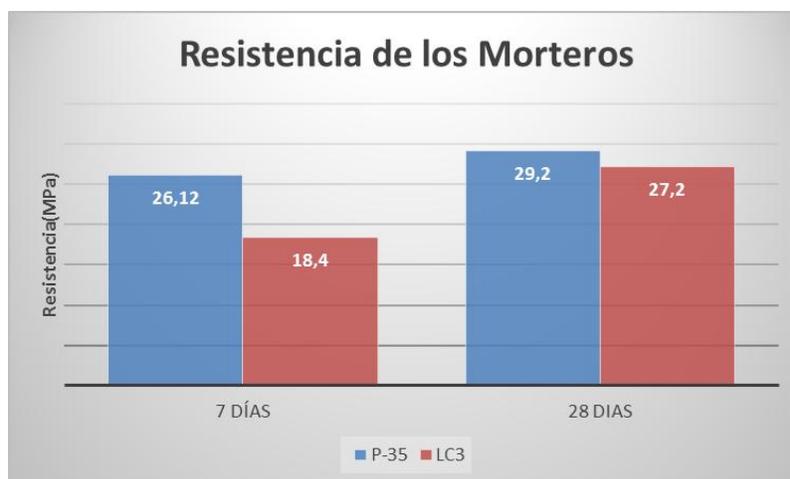
| Tiempos de fraguado (Min) | LC3 | P-35 |
|---------------------------|-----|------|
| T.Inicial                 | 36  | 45   |
| T.Final                   | 153 | 168  |

### 3.3 Ensayo de los Morteros

En la figura 3.7 se observa que los dos cementos, tanto el LC<sup>3</sup> como el P-35 cumplen con las especificaciones de la NC 506 expuesta en el Instructivo técnico para la prueba industrial de 2018. Al comparar ambos cementos entre sí se puede apreciar que el P-35 presenta un mejor comportamiento en cuanto a resistencia mecánica que el LC<sup>3</sup>. Además

se obtuvo el IAP mediante la siguiente fórmula: 
$$IAP = \left( \frac{P35 - LC3}{LC3} \right) * 100$$
 donde se pudo apreciar que el mismo está por encima del 75% lo que se considera satisfactorio

En esta tabla 3.7 se puede observar la resistencia que alcanzan las diferentes dosificaciones a lo largo del tiempo, ambos cementos alcanzan la resistencia máxima deseada a los 28 días, donde la NC 506 exige que tiene que tener una resistencia de 25 MPa.



**Fig.3.7: Resistencia a compresión de los morteros**

Tabla 3.7: Comportamiento de la resistencia en el tiempo dado

| Cementos | 7 días | 28 días |
|----------|--------|---------|
| P-35     | 26,12  | 29,2    |
| LC3      | 18,4   | 27,2    |

### 3.4 Análisis de los resultados de los bloques huecos de hormigón

#### 3.4.1 Ensayo de las dimensiones

El ensayo de dimensiones se les realizó a 5 bloques de cada una de las 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 1. Las mediciones promedio del lote de bloques incluyendo las tres series son las que se muestran en la Tabla 3.8

Tabla 3.8: Resultado del ensayo de dimensiones del lote de bloques fabricados

| Dimensiones | Dimensiones promediodel lote del LC3 (mm) | Dimensiones de fabricación especificadas en la NC 247-2010 |
|-------------|---|--|
| Longitud    | 400                                       | 395 ± 3mm  |
| Altura      | 207,4                                     | 195 ± 3mm  |
| Ancho       | 99,6                                      | 100 ± 3 mm   |

Como se observa los bloques huecos de hormigón no cumplen con las dimensiones de fabricación especificadas en la norma para bloques tipo III, en cuanto a su longitud y altura, pero con respecto a su ancho si cumple. Lo que se debe a que probablemente sea consecuencia de la falta de experiencia de los operadores con el nuevo equipo, que no suministran todo el material necesario y/o exceden el tiempo de vibrado y compactación.

### 3.4.2 Ensayo de la resistencia a compresión

Se ensayaron 5 bloques huecos de hormigón en la Empresa de Tubos, en Materias Primas obtenidos con LC<sup>3</sup> y se compararon con los bloques de cemento P-35 fabricados en el Taller de Mantenimiento de Agabama, y los hechos en la empresa Rolando Morales en el municipio de Cifuentes cada una de las series fabricadas se ensayaron a los 7 y 28 días respectivamente; para los cálculos se utilizaron las expresiones según se especifica en la NC 247-2010 y a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.9: Resistencia a Compresión

| Resistencia a Compresión a los 7 días |     |     |     |     |     | Prom |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| LC3                                   | 5,1 | 5   | 5,2 | 5,4 | 5,2 | 5,2  |
| P-35 Fomento                          | 4,2 | 2,2 | 3,3 | 3,5 | 2,6 | 3,2  |
| P-35 Cifuyente                        | 2,5 | 2,6 | 2,4 | 2,6 | 2,4 | 2,5  |

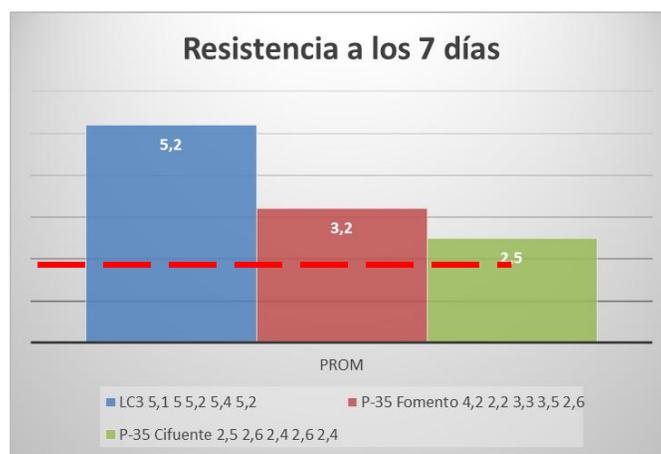


Fig.3.8: Resistencia a compresión a los 7 días

Tabla 3.10: Resistencia a compresión de cada muestra

| Resistencia a Compresión a los 28 días |     |     |     |     |     | Prom |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| LC3                                    | 7,4 | 7,5 | 6,7 | 7,1 | 7,3 | 7,2  |
| P-35 Fomento                           | 5,8 | 4,4 | 3,4 | 3,7 | 4,3 | 4,3  |
| P-35 Cifuentes                         | 3,2 | 4   | 5,6 | 2,7 | 3,1 | 3,7  |



Fig.3.9: Resistencia a compresión a los 28 días

En la Figura 3.8 y 3.9 respectivamente se puede ver, como en el ensayo de resistencia a compresión a los 7 días, todos los bloques ensayados cumplieron con la resistencia mínima de 2 MPa (línea roja) establecida en la NC 247: 2010 para bloques tipo III, y a los 28 días también cumplieron satisfactoriamente con el valor mínimo de resistencia a la compresión de 2,5 MPa (línea amarilla). Se puede apreciar visiblemente que los bloques producidos con el cemento LC<sup>3</sup> poseen una mayor resistencia que los demás bloques y que sobrepasa ampliamente con la exigida en la NC 247:2010, por lo que se recomienda echar menos cementos; siempre y cuando siga cumpliendo con lo establecido en dicha norma, así reducimos los gastos de materiales. Además se le obtuvo un resumen estadístico donde se expone el nivel de confianza, así como la desviación típica (Ver anexo 2)

### 3.4.3 Absorción de agua de los bloques huecos de hormigón

El ensayo de absorción de los bloques huecos de hormigón se les realizó a 3 bloques de cada una de las series fabricadas con el objetivo de tener una idea de cuánto absorbe cada tipo de bloque, pues la NC 247: 2010 no establece que se le haga este ensayo para

bloques tipo III. Este ensayo se realizó a la edad de 28 días y se utilizaron las expresiones establecidas en dicha norma. Lo expresado se puede apreciar en la siguiente tabla y gráfico respectivamente.

Tabla 3.11: Absorción de agua para cada serie de bloque

| Absorción de agua |     |     |     |      |     | Prom |
|-------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| LC3               | 2,1 | 2,7 | 1,4 | 2,1  | 5   | 2,7  |
| P-35 Fomento      | 10  | 4,2 | 7,6 | 11,2 | 7,6 | 8,1  |
| P-35 Cifuenta     | 0,8 | 0   | 2,6 | 3,4  | 3,6 | 0    |

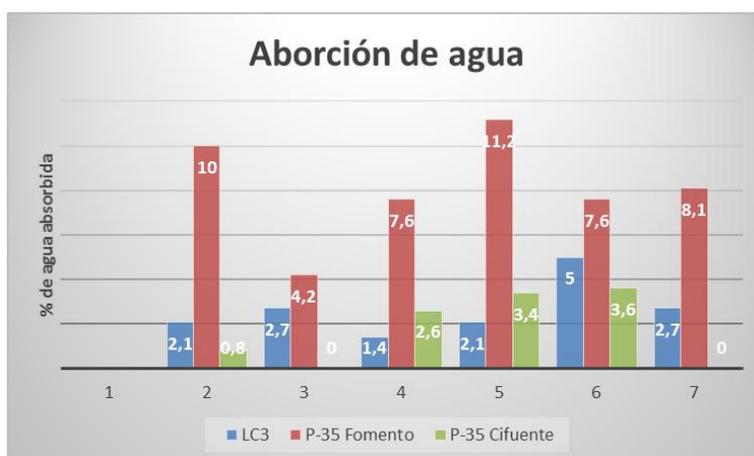


Fig.3.10 Absorción de agua

Se puede observar que los bloques producidos con cemento P-35 en Fomento absorben más agua que los elaborados con LC<sup>3</sup> lo cual puede estar asociado a la disminución de la porosidad y el aumento de la compacidad dada por las reacciones puzolánicas provenientes de la AAT.

### 3.5 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 de la antigua URSS, TIPO-P, con capacidad de 1500 KN.

Para este ensayo se rompieron 6 probetas de cada cemento a los 7 y 28 días y se calculó la resistencia a compresión mediante la siguiente fórmula:

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

**F:** Carga de rotura (KN)

**A :** Área de la sección transversal de la probeta cm<sup>2</sup>

La resistencia a compresión de la serie de las probetas (fcs) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n}$$

n: tamaño de la muestra de ensayo



**Fig.3.11: Ensayo de resistencia a la compresión a las probetas de hormigón**

Los resultados a la resistencia a compresión obtenidos a los 7 y 28 días se muestran en la tabla 3.12

Tabla 3.12: Resistencia a compresión de las probetas

| Cemento | Resistencia a Compresión |      |      |         |      |      |
|---------|--------------------------|------|------|---------|------|------|
|         | 7 días                   |      |      | 28 días |      |      |
| LC3     | 10,8                     | 11,9 | 11,5 | 19,4    | 19,1 | 19,8 |
| P35     | 12,9                     | 12,1 | 14,6 | 19,7    | 20,5 | 20,2 |

Como se puede apreciar el P-35 posee mayor resistencia que el LC<sup>3</sup> de producción local a los 7 y los 28 días de ensayados, lo que puede estar provocado por los altos contenidos de adición presentes en la composición de estos aglomerantes, donde se reduce el contenido de clínker hasta un 44%. Pero aclarar que ambos cementos cumplen con las especificaciones de la NC 120 de 2007. Lo anterior expuesto se puede observar en el siguiente gráfico.

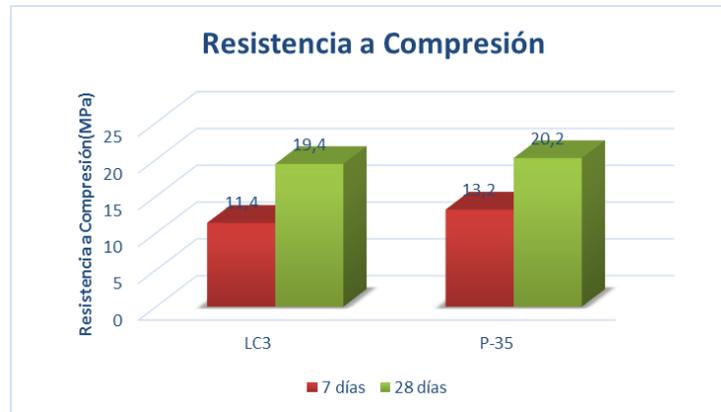


Fig.3.12: Resistencia promedio de las probetas

### 3.7 Análisis técnico – económico del proceso de obtención del LC<sup>3</sup> y los elementos formados a partir de dicho cemento.

En el anexo 3 se presenta un resumen con la información económica suministrada por la empresa. Está bien establecido y aprobadas las fichas de costo para cada uno de los elementos producidos y comercializados a través del programa nacional, en la Tabla 3.13 se presenta un resumen obtenido de las fichas de costos elaborados en la entidad, donde se detallan los precios de los materiales para cada uno de los elementos analizados en el presente trabajo. Sobre la base de la información anterior y de conjunto con el departamento de producción de la entidad se han estimado los costos para la producción local del LC<sup>3</sup> y su influencia sobre los costos de cada uno de los elementos, quedando demostrado que al multiplicar la cantidad de aglomerante con la adición de AAT se reducen los costos de todos y cada uno de los productos, manteniendo los requisitos de calidad exigidos.

Tabla 3.13 Costo de los materiales para cada elemento

| Elementos        | Cantidad | Costo(CUP) |
|------------------|----------|------------|
| ladrillos huecos | 1000     | 288,992    |
| bloque 10        | 1        | 0,4158169  |
| plaqueta         | 1        | 3,05121996 |
| vigueta          | 1        | 4,1177578  |
| losa hexagonal   | 1        | 1,6134     |

Tabla 3.14: Costos de las materias primas para la obtención del LC<sup>3</sup>

| Para 50 Kg de LC <sup>3</sup> |              |              |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Materias Primas               | Cantidad(Kg) | Importe(CUP) |
| P-35                          | 25           | 3,43         |
| AAT                           | 15           | 1,44         |
| Polvo de piedra               | 10           | 1,24         |
| Total                         | 50           | 6,11         |

### 3.8 Conclusiones Parciales

- La demanda de agua para lograr la laborabilidad requerida en las mezclas usando el cemento LC<sup>3</sup> de Fomento 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 el cemento producido en Fomento, cumplen con las resistencias mínimas a los 7 y 28 según lo especificado en la NC 247-2010 y poseen un 40% mayor de resistencia que los bloques producidos con P-35 en la misma localidad, disminuyendo así mismo la capacidad de absorción de los bloques.
- Los hormigones producidos con LC<sup>3</sup> cumplen los requisitos de la norma NC, demostrándose a nivel de laboratorio y con la fabricación local de vigas y tabletas la posible aplicación de esta solución en la fabricación de elementos de piso y techo.
- La obtención del cemento LC<sup>3</sup> producido a partir de materias primas locales reduce los costos de producción, lo cual garantiza su factibilidad técnico – económica al ser obtenido en dicha localidad.

## Conclusiones Generales

- El cemento LC<sup>3</sup> fabricado a pequeña escala, a partir de los desechos de cerámica y las materias primas disponibles en la localidad, cumplen con el requisito de finura según la NC 95-2001
- El cemento LC<sup>3</sup> artesanal requieren de mayor cantidad de agua para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad que el cemento P-35.
- La utilización del cemento LC<sup>3</sup> 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 el desarrollo local.
- El hormigón elaborado con el cemento LC<sup>3</sup> de producción local, empleando la misma dosificación que se utiliza en la producción local presenta adecuados índices a la resistencia a compresión a los 7 y 28 días.

## **Recomendaciones**

- Como los bloques producidos a partir de la obtención del LC<sup>3</sup> poseen una elevada resistencia a los 7 y 28 días, recomiendo emplear otras dosificaciones en aras de minimizar los recursos y así el costo de producción.
- Mejorar y darle mantenimiento sistemático al molino de bolas MB-600 para lograr una adecuada molienda del material y minimizar el tiempo de producción.

## Bibliografía

- AGUIAR, A. 2014. *Evaluación de las propiedades físico - mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono*. UCLV.
- ALUJAS, A. & MARTIRENA, J. F. 2010. Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(3): , 329–352.
- ARRIETA, F. P., J 2001. Fabricación de bloques de concreto con una mesa vibratoria, Programa Científico PC – CISMID, Perú.
- BERGAL, A. 2017. *Formulación y evaluación de cementos de bajo carbona con arcillas calcinadas del yacimiento Neptuno, Artemisa*. UCLV.
- BIANUCCI, A. 2009. El ladrillo-Orígenes y desarrollo. . *Instituto argentino de cerámica roja*.
- CASTILLO, R. 2010. Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza.
- CIDEM. 2011. Manual Instructivo para la producción de bloques huecos de hormigón con la maquina Vibracom.
- CIDEM. 2015. Manual de calidad para cemento de bajo carbono.
- CONTRERAS, Y. 2015. *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.*, UCLV.
- COSTRUCCIÓN., E. D. M. Y. 2006. Manual de Instrucciones para el diseño y construcción. Ciudad de La Habana.
- DELGADO, E. 2014. *Evaluación energético ambiental de la producción de Cemento Portland Ordinario (CPO) con la adición de Arcillas Activadas Térmicamente.*, UCLV.
- DÍAZ-PONCE, O. A. 2012. *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- DÍAZ, Y. 2011. *Evaluación del uso del carbonato de calcio como aditivo fundente en la producción de ladrillos cerámica roja*. Investigación y desarrollo. UCLV.
- DOPICO, J. & MARTIRENA, J. F. 2008. Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. Santa Clara, Cuba.
- DUMÉNIGO, L. 2012. *Evaluación de la influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de los hornos del combinado de cerámica roja Sergio Soto de Manicaragua*. UCLV.
- ESTOPIÑALES, A. 2016. *Proyecto de norma cubana para la utilización de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario basadas en la modificación de las NC 527:2013 y NC 528:2013*. UCLV.
- FERNANDEZ, L. 2013. *Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínker a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales*”.UCLV.
- FERNÁNDEZ, R., MARTIRENA, J. F. & SCRIVENER, K. L. 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research.*, 41(1):, 113–122.
- FERNÁNDEZ, R., MARTIRENA, F. SCRIVENER, K. 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement y Concrete Research*, 41.

- FRÍAS, M. 2013. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin±cement pastes. *Cement and Concrete Research*.
- GONGALVES, S. 2009. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. . *Construction and Building Materials*.
- HABERT, G. 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*.
- HERRERA, J. 2008. *El taller de ecomateriales*. UCLV.
- JIMÉNEZ, C. A. 2016. *Evaluación de las propiedades puzolánicas del material de desecho de la producción de cerámica roja.*, UCLV.
- LINDNER, T. 2005. Química del Clínter.
- MACHADO, I. & MARTIRENA, J. F. 2017. Mejora del impacto ambiental de la producción de ladrillos, sobre la base del empleo como biocombustible de material lignocelulósico densificado y el reciclaje de los desechos cerámicos generados. Mofraque Resiliente.
- MARTIRENA, J. F. 2015a. La producción local del cemento de bajo carbono LC3. *Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3*.
- MARTIRENA, J. F. 2015b. La producción local del cemento de bajo carbono LC3. *Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3*.
- MARTIRENA, J. F. 2015c. LC 3 Limestone Calcined Clay Cement. Project. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suiza, Universidad Central de las Villas, .
- MASSANA GUITART, D. 2010. *Durabilidad de morteros de cemento en contacto con Purines de Cerdo*, Madrid, España., Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.
- MEDINA, B. 2016. En busca de un cemento más “ecológico”. 2.
- MORALES, G. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. UCLV.
- OLIVIER, J. 2012. Trends in global CO2 emissions 2012.
- PÉREZ-CABRERA, A. F. 2016. Cemento ecológico, un logro de incalculable valor. Santa Clara, Cuba.
- ROGERS, S. B. 2011. *Evaluation and Testing of Brick Dust as a Pozzolanic Additive to Lime Mortars for Architectural Conservation*. University of Pennsylvania, Philadelphia.
- SABIR, B. B., WILD, S. & BAI, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
- SAMET, B., MNIF, T. & CHAABOUNI, M. 2007. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cement & Concrete Composites*, 29, 741-749.
- SCRIVENER, F. A. 2015. *Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) testing method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined clays*. *Proceedings of 1st CCC*.
- SCRIVENER, K. L. 2014. Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal*., 88.
- SIDDIQUE, R. & KLAUS, J. 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*, 43 392-400.
- TALERO, R. 2008. Diferenciación cinética y morfológica de Ettringitas mediante Metakaolín, cementos Portland y el ensayo ASTM C 452-68. Parte I. 58, 56.

- THIENEL, C. & BEUNTNER, N. 2015. Efficiency of calcined clay in cementitious systems. . *Conference: 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues.*
- TIRONI, A. 2013. *Materiales cementicios de baja energía activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica.*, Universidad Nacional de la Plata.
- TURANLI , L. 2004. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research.*
- VIZCAINO, L. 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer- arcilla calcinada- caliza.* UCLV.
- VIZCAÍNO, L. M. 2014. *CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA - CALIZA.* Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas., UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS.
- WBCD, C. 2012. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. *Emissions Monitoring and Reporting 2012.*
- ZERQUERA, I. V. 2013. En la forja del cemento ecológico. *Periodico Vanguardia.*

## Anexos

### Anexo 1: Ensayos de las tres muestra de bloques a los 7 días

| <b>BLOQUES LC3</b>  |          |          |          |          |       |          |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|
| <b>PARÁMETROS</b>   | 1        | 2        | 3        | 4        | 5     | Prom     |
| <b>DIMENSIONES</b>  |          |          |          |          |       |          |
| Largo(mm)           | 400      | 400      | 400      | 400      | 400   | 400      |
| Ancho(mm)           | 99       | 100      | 100      | 99       | 100   | 99,6     |
| Altura(mm)          | 206      | 209      | 205      | 208      | 209   | 207,4    |
| <b>MASA</b>         |          |          |          |          |       |          |
| Peso Ambiente(Kg)   | 13       | 13,1     | 13,2     | 13,3     | 13,6  | 13,24    |
| <b>FORMA</b>        |          |          |          |          |       |          |
| Rectitud de Aristas | 1        | 0,9      | 0,6      | 1,1      | 0,6   | 0,84     |
| Flecha Máxima       | 1,4      | 0,6      | 0,8      | 0,9      | 1,2   | 0,98     |
| <b>COMPRESIÓN</b>   |          |          |          |          |       |          |
| Carga Aplicada      | 202      | 203      | 210      | 215      | 209   | 207,8    |
| Área                | 39600    | 40000    | 40000    | 39600    | 40000 | 39840    |
| Esfuerzo            | 5,10101  | 5,075    | 5,25     | 5,429293 | 5,225 | 5,215863 |
| <b>ABSORCIÓN</b>    |          |          |          |          |       |          |
| Peso seco           | 14,2     | 14,3     | 13,6     | 13,8     | 14    | 13,98    |
| Peso humedo         | 14,5     | 14,7     | 13,8     | 14,1     | 14,7  | 14,36    |
| Diferencia          | 0,3      | 0,4      | 0,2      | 0,3      | 0,7   | 0,38     |
| % Absorción         | 2,112676 | 2,797203 | 1,470588 | 2,173913 | 5     | 2,718169 |

## BLOQUES DE ROLANDO MORALES EN CIFUENTES

| PARÁMETROS             | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | Prom     |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>DIMENSIONES</b>     |          |          |          |          |          |          |
| Largo(mm)              | 397      | 398      | 397      | 396      | 396      | 396,8    |
| Ancho(mm)              | 95       | 93       | 94       | 96       | 94       | 94,4     |
| Altura(mm)             | 193      | 195      | 194      | 197      | 198      | 195,4    |
| <b>MASA</b>            |          |          |          |          |          |          |
| Peso Ambiente(Kg)      | 11,2     | 10,4     | 11,2     | 10,9     | 10,7     | 10,88    |
| <b>FORMA</b>           |          |          |          |          |          |          |
| Rectitud de Aristas    | 1        | 2        | 2        | 1,4      | 1,6      | 1,6      |
| Flecha Máxima          | 0,4      | 0,1      | 1,9      | 1,2      | 1,8      | 1,08     |
| <b>COMPRESIÓN</b>      |          |          |          |          |          |          |
| Carga Aplicada         | 95       | 98       | 93       | 100      | 92       | 95,6     |
| Área(mm <sup>2</sup> ) | 37715    | 37014    | 37318    | 38016    | 37224    | 37457,92 |
| Esfuerzo               | 2,518892 | 2,647647 | 2,492095 | 2,630471 | 2,471524 | 2,552197 |
| <b>ABSORCIÓN</b>       |          |          |          |          |          |          |
| Peso seco              | 11,8     | 11,7     | 11,3     | 11,6     | 11       | 11,48    |
| Peso humedo            | 11,9     | 11,7     | 11,6     | 12       | 11,4     | 11,48    |
| Diferencia             | 0,1      | 0        | 0,3      | 0,4      | 0,4      | 0        |
| % Absorción            | 0,847458 | 0        | 2,654867 | 3,448276 | 3,636364 | 0        |

## BLOQUES DE FOMENTO

| PARÁMETROS          | 1        | 2        | 3        | 4       | 5        | Prom     |
|---------------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| <b>DIMENSIONES</b>  |          |          |          |         |          |          |
| Largo(mm)           | 401      | 401      | 401      | 400     | 401      | 400,8    |
| Ancho(mm)           | 100      | 100      | 100      | 100     | 100      | 100      |
| Altura(mm)          | 215      | 215      | 217      | 215     | 216      | 215,6    |
| <b>MASA</b>         |          |          |          |         |          |          |
| Peso Ambiente(Kg)   | 12,1     | 11,9     | 12,4     | 11,8    | 12,2     | 12,08    |
| <b>FORMA</b>        |          |          |          |         |          |          |
| Rectitud de Aristas | 1,2      | 1,4      | 0,9      | 0,8     | 3,4      | 1,54     |
| Flecha Máxima       | 0,8      | 1,2      | 0,9      | 0,6     | 1,6      | 1,02     |
| <b>COMPRESIÓN</b>   |          |          |          |         |          |          |
| Carga Aplicada      | 172      | 92       | 135      | 143     | 105      | 129,4    |
| Área                | 40100    | 40100    | 40100    | 40000   | 40100    | 40080    |
| Esfuerzo            | 4,289277 | 2,294264 | 3,366584 | 3,575   | 2,618454 | 3,228543 |
| <b>ABSORCIÓN</b>    |          |          |          |         |          |          |
| Peso seco           | 11,9     | 11,7     | 11,7     | 11,6    | 11,8     | 11,74    |
| Peso humedo         | 13,1     | 12,2     | 12,6     | 12,9    | 12,7     | 12,7     |
| Diferencia          | 1,2      | 0,5      | 0,9      | 1,3     | 0,9      | 0,96     |
| % Absorción         | 10,08403 | 4,273504 | 7,692308 | 11,2069 | 7,627119 | 8,177172 |

## Anexo 1: Ensayos de las tres muestra de bloques a los 28 días

| <b>BLOQUES LC3</b>  |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PARÁMETROS          | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | Prom       |
| <b>DIMENSIONES</b>  |            |            |            |            |            |            |
| Largo(mm)           | 400        | 400        | 400        | 400        | 400        | 400        |
| Ancho(mm)           | 100        | 99         | 100        | 100        | 99         | 99,6       |
| Altura(mm)          | 205        | 207        | 210        | 208        | 209        | 207,8      |
| <b>MASA</b>         |            |            |            |            |            |            |
| Peso Ambiente(Kg)   | 13         | 13,1       | 13,2       | 13,3       | 13,6       | 13,24      |
| <b>FORMA</b>        |            |            |            |            |            |            |
| Rectitud de Aristas | 1          | 0,9        | 0,6        | 1,1        | 0,6        | 0,84       |
| Flecha Máxima       | 1,4        | 0,6        | 0,8        | 0,9        | 1,2        | 0,98       |
| <b>COMPRESIÓN</b>   |            |            |            |            |            |            |
| Carga Aplicada      | 297        | 300        | 270        | 286        | 291        | 288,8      |
| Área                | 40000      | 39600      | 40000      | 40000      | 39600      | 39840      |
| Esfuerzo            | 7,425      | 7,57575758 | 6,75       | 7,15       | 7,34848485 | 7,24899598 |
| <b>ABSORCIÓN</b>    |            |            |            |            |            |            |
| Peso seco           | 14,2       | 14,3       | 13,6       | 13,8       | 14         | 13,98      |
| Peso humedo         | 14,5       | 14,7       | 13,8       | 14,1       | 14,7       | 14,36      |
| Diferencia          | 0,3        | 0,4        | 0,2        | 0,3        | 0,7        | 0,38       |
| % Absorción         | 2,11267606 | 2,7972028  | 1,47058824 | 2,17391304 | 5          | 2,71816881 |

| <b>BLOQUES DE ROLANDO MORALES EN CIFUENTES</b> |            |            |            |            |            |            |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PARÁMETROS                                     | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | Prom       |
| <b>DIMENSIONES</b>                             |            |            |            |            |            |            |
| Largo(mm)                                      | 397        | 398        | 397        | 396        | 396        | 396,8      |
| Ancho(mm)                                      | 95         | 93         | 94         | 96         | 94         | 94,4       |
| Altura(mm)                                     | 193        | 195        | 194        | 197        | 198        | 195,4      |
| <b>MASA</b>                                    |            |            |            |            |            |            |
| Peso Ambiente(Kg)                              | 11,2       | 10,4       | 11,2       | 10,9       | 10,7       | 10,88      |
| <b>FORMA</b>                                   |            |            |            |            |            |            |
| Rectitud de Aristas                            | 1          | 2          | 2          | 1,4        | 1,6        | 1,6        |
| Flecha Máxima                                  | 0,4        | 0,1        | 1,9        | 1,2        | 1,8        | 1,08       |
| <b>COMPRESIÓN</b>                              |            |            |            |            |            |            |
| Carga Aplicada                                 | 121        | 150        | 210        | 105        | 117        | 140,6      |
| Área(mm <sup>2</sup> )                         | 37715      | 37014      | 37318      | 38016      | 37224      | 37457,92   |
| Esfuerzo                                       | 3,20827257 | 4,05252067 | 5,62731122 | 2,76199495 | 3,14313346 | 3,75354531 |
| <b>ABSORCIÓN</b>                               |            |            |            |            |            |            |
| Peso seco                                      | 11,8       | 11,7       | 11,3       | 11,6       | 11         | 11,48      |
| Peso humedo                                    | 11,9       | 11,7       | 11,6       | 12         | 11,4       | 11,48      |
| Diferencia                                     | 0,1        | 0          | 0,3        | 0,4        | 0,4        | 0          |
| % Absorción                                    | 0,84745763 | 0          | 2,65486726 | 3,44827586 | 3,63636364 | 0          |

| BLOQUES DE FOMENTO  |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PARÁMETROS          | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | Prom       |
| <b>DIMENSIONES</b>  |            |            |            |            |            |            |
| Largo(mm)           | 401        | 402        | 402        | 402        | 401        | 401,6      |
| Ancho(mm)           | 100        | 102        | 101        | 101        | 102        | 101,2      |
| Altura(mm)          | 215        | 215        | 215        | 213        | 214        | 214,4      |
| <b>MASA</b>         |            |            |            |            |            |            |
| Peso Ambiente(Kg)   | 11,7       | 11         | 11         | 11,1       | 11,2       | 11,2       |
| <b>FORMA</b>        |            |            |            |            |            |            |
| Rectitud de Aristas | 1,2        | 1,3        | 0,7        | 0,8        | 1,2        | 1,04       |
| Flecha Máxima       | 0,8        | 0,9        | 0,6        | 1,1        | 1,3        | 0,94       |
| <b>COMPRESIÓN</b>   |            |            |            |            |            |            |
| Carga Aplicada      | 235        | 182        | 142        | 152        | 176        | 177,4      |
| Área                | 40100      | 41004      | 40602      | 40602      | 40902      | 40641,92   |
| Esfuerzo            | 5,86034913 | 4,43859136 | 3,49736466 | 3,74365795 | 4,30296807 | 4,36495126 |
| <b>ABSORCIÓN</b>    |            |            |            |            |            |            |
| Peso seco           | 11,9       | 11,7       | 11,7       | 11,6       | 11,8       | 11,74      |
| Peso humedo         | 13,1       | 12,2       | 12,6       | 12,9       | 12,7       | 12,7       |
| Diferencia          | 1,2        | 0,5        | 0,9        | 1,3        | 0,9        | 0,96       |
| % Absorción         | 10,0840336 | 4,27350427 | 7,69230769 | 11,2068966 | 7,62711864 | 8,17717206 |

## Anexo 2: Resumen estadístico

### Resumen Estadístico de los bloques a los 7 días

|                 | <i>Recuento</i> | <i>Prom</i> | <i>Desviación Estándar</i> | <i>Coficiente de Variación</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Rango</i> |
|-----------------|-----------------|-------------|----------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| LC <sup>3</sup> | 6               | 5,18        | 0,132916                   | 2,56%                          | 5,0           | 5,4           | 0,4          |
| P35 Fomento     | 6               | 3,16        | 0,700476                   | 22,12%                         | 2,2           | 4,2           | 2,0          |
| P35 Cifuentes   | 6               | 2,5         | 0,0894427                  | 3,57%                          | 2,4           | 2,6           | 0,2          |
| Total           | 18              | 3,61        | 1,23681                    | 34,19%                         | 2,2           | 5,4           | 3,2          |

|               | <i>Sesgo Estandarizado</i> | <i>Curtosis Estandarizada</i> |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|
| LC3           | 0,44                       | 0,66                          |
| P35 Fomento   | 0,05                       | -0,02                         |
| P35 Cifuentes | 0,0                        | -0,93                         |
| Total         | 0,67                       | -1,50                         |

Para probar diferencias significativas entre las medias de las columnas, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Hay una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar más pequeña y la más grande. Esto puede causar problemas puesto

que el análisis de varianza asume que las desviaciones estándar de todos los niveles son igual. Seleccione Verificación de Varianza de la lista de Opciones Tabulares para ejecutar una prueba estadística formal para la diferencia entre las sigmas. Tal vez quisiera considerar transformar los datos para eliminar cualquier dependencia de la desviación estándar sobre la media.

**Tabla ANOVA**

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos  | 23,42                    | 2         | 11,71                 | 68,05          | 0,0000         |
| Intra grupos  | 2,58                     | 15        | 0,17                  |                |                |
| Total (Corr.) | 26,00                    | 17        |                       |                |                |

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 68,0471, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

### **Pruebas de Múltiple Rangos**

Método: 95,0 porcentaje LSD

|               | <i>Casos</i> | <i>Media</i> | <i>Grupos Homogéneos</i> |
|---------------|--------------|--------------|--------------------------|
| P35 Cifuentes | 6            | 2,5          | X                        |
| P35 Fomento   | 6            | 3,16         | X                        |
| LC3           | 6            | 5,18         | X                        |

| <i>Contraste</i>            | <i>Sig.</i> | <i>Diferencia</i> | <i>+/-<br/>Límites</i> |
|-----------------------------|-------------|-------------------|------------------------|
| LC3 - P35 Fomento           | *           | 2,01              | 0,51                   |
| LC3 - P35 Cifuentes         | *           | 2,68              | 0,51                   |
| P35 Fomento - P35 Cifuentes | *           | 0,66              | 0,51                   |

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

#### Verificación de Varianza

|          | <i>Prueba</i> | <i>Valor-P</i> |
|----------|---------------|----------------|
| Levene's | 5,13          | 0,02           |

Los estadísticos mostrados en esta tabla evalúan la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las 3 columnas son iguales. De particular interés es el valor-P. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. Esto viola uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes.

### Resumen Estadístico 28 días

|                 | <i>Recuento</i> | <i>Promedio</i> | <i>Desviación Estándar</i> | <i>Coefficiente de Variación</i> | <i>Mín.</i> | <i>Máx.</i> | <i>Rango</i> |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| LC <sup>3</sup> | 6               | 7,2             | 0,282843                   | 3,92%                            | 6,7         | 7,5         | 0,8          |
| P35 Fomento     | 6               | 4,31            | 0,82805                    | 19,18%                           | 3,4         | 5,8         | 2,4          |
| P35 Cifuentes   | 6               | 3,71            | 1,03037                    | 27,72%                           | 2,7         | 5,6         | 2,9          |
| Total           | 18              | 5,07            | 1,72782                    | 34,02%                           | 2,7         | 7,5         | 4,8          |

|               | <i>Sesgo Estandarizado</i> | <i>Curtosis Estandarizada</i> |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|
| LC3           | -1,19                      | 0,83                          |
| P35 Fomento   | 1,19                       | 1,11                          |
| P35 Cifuentes | 1,44                       | 1,18                          |
| Total         | 0,44                       | -1,42                         |

Para probar diferencias significativas entre las medias de las columnas, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Seleccione Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas para mostrar gráficamente las medias. Hay una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar más pequeña y la más grande. Esto puede causar problemas puesto que el análisis de varianza asume que las desviaciones estándar de todos los niveles son igual. Seleccione Verificación de Varianza de la lista de Opciones Tabulares para ejecutar una prueba estadística formal para la diferencia entre las sigmas. Tal vez quisiera considerar transformar los datos para eliminar cualquier dependencia de la desviación estándar sobre la media.

**Tabla ANOVA**

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos  | 41,61                    | 2         | 20,80                 | <b>34,16</b>   | <b>0,00</b>    |
| Intra grupos  | 9,13                     | 15        | 0,60                  |                |                |
| Total (Corr.) | 50,75                    | 17        |                       |                |                |

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 34,16, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

### Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

|               | Casos | Media | Grupos Homogéneos |
|---------------|-------|-------|-------------------|
| P35 Cifuentes | 6     | 3,71  | X                 |
| P35 Fomento   | 6     | 4,31  | X                 |
| LC3           | 6     | 7,2   | X                 |

| Contraste                       | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|---------------------------------|------|------------|-------------|
| LC <sup>3</sup> - P35 Fomento   | *    | 2,88       | 0,96        |
| LC <sup>3</sup> - P35 Cifuentes | *    | 3,48       | 0,96        |
| P-35 Fomento - P35 Cifuentes    |      | 0,6        | 0,96        |

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este

método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

### Anexo 3 Ficha de Costo de los elementos prefabricados

| CODIGO DEL PRODUCTO |                      |     | DESCRIPCION DEL PRODUCTO: Bloque 40x20x10 de LC3 |        |                   |         |                 |  |
|---------------------|----------------------|-----|--|--------|-------------------|---------|-----------------|--|
| UNIDAD DE MEDIDA: U |                      |     | CANTIDADES FISICAS: U                            |        |                   |         |                 |  |
|                     |                      |     | COSTO REAL                                       |        | UNITARIO          | IMPORTE |                 |  |
| CODIGO              | PRODUCTO             | UM  | CONSUMO REAL                                     | TOTAL  | De ello en CUC    |         | De ello, en CUC |  |
| 1                   | 2                    | 3   | 4  | 5      | 6                 | 7       | 8               |  |
|                     | LC2                  | Tn  | 0.000585   | 30.785 | 0.062712          |         |                 |  |
|                     | Cemento Gris         | Tn  | 0.000585   | 68.785 | 0.04023923        |         |                 |  |
|                     | Polvo Piedra         | M3  | 0.0045   | 22.66  | 0.10197           |         |                 |  |
|                     | Granito              | M3  | 0.006  | 21.49  | 0.12894           |         |                 |  |
|                     | Sub Total            |     |  |        | 0.33386123        |         |                 |  |
|                     | Agua                 | M3  | 0.001  | 1.55   | 0.00155           |         |                 |  |
|                     | Diesel               | Lts | 0.02   | 0.73   | 0.0146            |         |                 |  |
|                     | Energía Eléctrica    | kw  | 0.015  | 0.52   | 0.0078            |         |                 |  |
|                     | <b>TOTAL GENERAL</b> |     |  |        | <b>0.35781123</b> |         |                 |  |

| DESAGREGACION DE LOS INSUMOS FUNDAMENTALES   |                 |     |  |        |                | FICHA        |                 |  |
|--|-----------------|-----|--|--------|----------------|--------------|-----------------|--|
|  |                 |     |  |        |                | COSTO - PAIS |                 |  |
| ORGANISMO/EMPRESA Poder Popular Provincial Emp. Prov. De Prod. De Mat. De Construcción |                 |     |  |        |                |              |                 |  |
| CODIGO DEL PRODUCTO  |                 |     | DESCRIPCION DEL PRODUCTO: Ladrillos Huecos |        |                |              |                 |  |
| UNIDAD DE MEDIDA: MU   |                 |     | CANTIDADES FISICAS: MU                     |        |                |              |                 |  |
|  |                 |     | COSTO REAL                                 |        | UNITARIO       | IMPORTE      |                 |  |
| CODIGO   | PRODUCTO        | UM  | CONSUMO REAL                               | TOTAL  | De ello en CUC |              | De ello, en CUC |  |
| 1  | 2               | 3   | 4  | 5      | 6              | 7            | 8               |  |
|  | Arcilla (barro) | M3  | 3.5  | 20.38  | 71.33          |              |                 |  |
|  | Fuel Oil        | Lts | 330  | 0.4423 | 145.959        |              |                 |  |
|  | Agua            | M3  | 1  | 1.55   | 1.55           |              |                 |  |
|  | Electricidad    | Kw  | 45   | 0.4374 | 19.683         |              |                 |  |
|  | Leña combust.   | M3  | 1.5  | 18.18  | 27.27          |              |                 |  |
|  | Diesel          | Lts | 40   | 0.58   | 23.2           |              |                 |  |
|  | <b>Total</b>    |     |  |        | <b>288.992</b> |              |                 |  |

| Elementos        | Cantidad | Costo(CUP) |
|------------------|----------|------------|
| ladrillos huecos | 1000     | 288.992    |
| bloque 10        | 1        | 0.4158169  |
| plaqueta         | 1        | 3.05121996 |
| vigueta          | 1        | 4.1177578  |
| losa hexagonal   | 1        | 1.6134     |