

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



**TRABAJO DE DIPLOMA**

---

**TÍTULO:** “Evaluación de las propiedades físico-mecánicas en morteros de restauración a partir de cementos de bajo carbono producidos localmente”.

---

**Diplomante:** Ismael A Calderón Bravo.

**Tutores:** Msc. Arq. Yoandi Lima Triana.  
Dr. Arq. Dania Betancourt Cura.

**Santa Clara**  
**2016**

## **EXERGO**

*“Si no existe la organización, las ideas, después del primer momento de impulso, van perdiendo eficacia.”*

*Che*

## DEDICATORIA

*A mi madre:*

*Porque la ilusión de su vida ha sido verme convertido en un profesional. Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación académica y de la vida. Por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, por siempre desear y anhelar lo mejor para mí.*

*Porque ha sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, por esto y más...*

*Gracias.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá y a David, porque sin ellos nada de esto fuese posible.*

*A mi novia, por su cariño y amor incondicional, por estar siempre a mi lado apoyándome.*

*A toda mi familia, por velar mis intereses y ser parte de ellos.*

*A mis tutores Dania y Yoandi, por brindarme sus conocimientos, atenderme y apoyarme durante horas de trabajo para la realización de este proyecto.*

*A mis suegros, por su preocupación y su apoyo.*

*Al equipo de trabajo de la ENIA, especialmente a Irelys y Sardiñas.*

*A todos los profesores que durante estos 5 años han contribuido a mi formación profesional.*

*A todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron e hicieron posible el logro de esta meta.*

*A todos,*

*¡Gracias!!!!*

## RESUMEN

La presente investigación muestra la evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería para la conservación de morteros históricos, mediante la realización de ensayos físico-mecánicos de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC 175:2002. Estos morteros son elaborados a partir de cementos de bajo carbono LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1), tomando como referencia al cemento Portland Puzolánico PP-25.

Se elaboraron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para la realización del ensayo de permeabilidad al agua, y probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm para los ensayos de resistencia a flexo-compresión, absorción de agua por capilaridad, densidad aparente en estado endurecido y porosidad abierta. Para analizar y valorar el comportamiento que pueden tener los cementos LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) en los morteros de albañilería se confeccionó un diseño experimental, en el que se consideraron las definiciones de variables dependientes, respondiendo a la propiedades de los morteros en sus diferentes estados, y variables independientes, analizando los tipos de cementos.

El análisis de los resultados se realizó mediante el software Statgraphics, lo que permitió el estudio del comportamiento de los cementos LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) en morteros de albañilería para su posible uso en la conservación de morteros históricos.

**Palabras clave:** morteros, conservación, físico-mecánicos, cemento LC3.

## **ABSTRACT**

This research shows the evaluation of the properties of masonry mortars for the preservation of historical mortars, through physical-mechanical tests according to the specifications in the Cuban standard NC 175:2002. These mortars are made from low carbon cements LC3-50 (2:1) and LC3-60 (2:1), taking the Portland pozzolan cement PP-25 as a reference point.

There were made cylindrical specimens of 15 x 30 cm for performing the essay of water permeability, and prismatic specimens of 40 x 40 x 160 mm for testing compressive and flexural strengths, water absorption by capillarity, density in the cured state and open porosity. To analyze and assess the behavior that LC3-50 (2:1) and LC3-60 (2:1) cements may have in masonry mortars, it was made an experimental design, in which there were considered the definitions of dependent variables, responding to the properties of mortars in different states, and independent variables, analyzing the types of cement.

The analysis of the results was performed using the Statgraphics software, which made possible the study of the behavior of LC3-50 (2:1) and LC3-60 (2:1) cements in masonry mortars for its possible use in the preservation of historical mortars.

**Keywords:** mortars, preservation, LC3 cement physical-mechanical.

## ÍNDICE

EXERGO .....	I
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT .....	V
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO .....	6
1.1. Morteros. Generalidades .....	6
1.1.1. Clasificación de los morteros .....	6
1.1.2. Constituyentes de los morteros de albañilería .....	8
1.1.3. Dosificaciones de los morteros de albañilería .....	10
1.1.4. Propiedades de los morteros de albañilería .....	11
1.1.5. Métodos de ensayo para la evaluación de morteros de albañilería.....	14
1.1.6. Normas de especificaciones de calidad y ensayos a los morteros.....	17
1.2. Adiciones puzolánicas. Generalidades .....	19
1.2.1. Clasificación de las puzolanas .....	19
1.2.2. Fundamentos de la actividad puzolánica .....	20
1.2.3. Métodos de análisis de la actividad puzolánica.....	21
1.2.4. Efectos de las puzolanas en las propiedades de ingeniería.....	22
1.3. Morteros para la conservación de obras arquitectónicas. Generalidades .....	23
1.3.1. Requerimientos de los morteros de restauración.....	23
1.3.2. Conglomerantes empleados en la conservación de morteros históricos .....	25
1.4. Cemento de bajo contenido de carbono (LC3) .....	26
1.4.1. Cementos ternarios con arcillas calcinadas .....	27
1.4.2. Producción local de LC3.....	27
1.4.3. Propiedades del cemento LC3.....	28
1.4.4. Aplicaciones e importancia del cemento LC3.....	29
1.4.5. Antecedentes del empleo de cemento LC3 en morteros de albañilería.....	29
1.5. Conclusiones parciales.....	31
CAPÍTULO II. EMPLEO DE LOS CEMENTOS LC3-50 Y LC3-60 EN MORTEROS DE ALBAÑILERÍA.....	32
2.1. Generalidades .....	32

2.2. Diseño experimental.....	32
2.3. Obtención y caracterización de las materias primas.....	33
2.3.1. Árido.....	34
2.3.2. Cementos.....	36
2.3.3. Cal.....	37
2.3.4. Agua.....	38
2.4. Fabricación de las mezclas de morteros.....	38
2.4.1. Ensayo de consistencia. NC 170:2002.....	39
2.4.2. Proceso de fabricación de las probetas. NC 173:2002.....	40
2.5. Ensayos físico-mecánicos a probetas de morteros. Procedimientos.....	40
2.5.1. Resistencia a flexión y compresión. NC 173:2002 y NC 506:2007.....	40
2.5.2. Absorción de agua por capilaridad. NC 171:2002.....	41
2.5.3. Ensayo de porosidad abierta. Procedimiento Dr. Andrade.....	42
2.5.4. Densidad aparente en estado endurecido. NC EN 1015-10:2008.....	42
2.5.5. Ensayo de permeabilidad al agua. JIS-1404:1977.....	43
2.6. Conclusiones parciales del capítulo.....	44
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A MORTEROS DE ALBAÑILERÍA ELABORADOS CON LC3.....	45
3.1. Análisis de resultados de la consistencia de los morteros.....	45
3.2. Análisis de resultados de la resistencia mecánica de los morteros.....	46
3.3. Análisis de los resultados de la absorción de agua por capilaridad en los morteros ..	50
3.3. Análisis de resultados de la densidad aparente en estado endurecido de los morteros	52
3.4. Análisis de resultados de la porosidad abierta de los morteros.....	53
3.5. Análisis de resultados de permeabilidad al agua de los morteros.....	55
3.6. Influencia del % de sustitución parcial de cemento en algunas propiedades de los morteros.....	56
3.7. Conclusiones parciales del capítulo.....	57
CONCLUSIONES GENERALES.....	58
RECOMENDACIONES.....	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS.....	66
Anexo 1: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la resistencia a compresión a los 28 días de edad.....	66

Anexo 2: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de ensayo. .... 69

Anexo 3: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la densidad aparente en estado endurecido a los 28 días de ensayo. .... 72

Anexo 4: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en el % de poros en estado endurecido a los 28 días de ensayo. .... 75

Anexo 5: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la permeabilidad al agua a los 28 días de ensayo. .... 78

## INTRODUCCIÓN

Las edificaciones patrimoniales en Cuba manifiestan un deterioro progresivo como consecuencia, entre otros factores, de la introducción de materiales contemporáneos que difieren de los tradicionales a la hora de llevar a cabo las intervenciones de conservación y rehabilitación (Alonso, 2014). La degradación del mismo constituye un tema de actualidad e interés para la comunidad científica en todas las latitudes ya que la mayoría de estas edificaciones se encuentran en estado crítico de deterioro (María, 2014)

La preocupación general por la conservación y restauración del patrimonio histórico-artístico ha ido en gran aumento en los últimos tiempos y ha aumentado el interés de profesionales, técnicos e investigadores sobre materiales, metodología y criterios de intervención. Actualmente se encuentran dos posturas contrapuestas: los que abogan por el uso de materiales y técnicas tradicionales, con los problemas derivados de la pérdida de fiabilidad o incapacidad de respuesta de estos productos a las necesidades actuales, y los que abogan por el uso de los materiales más modernos, con los problemas de adecuación y compatibilidad de estos (Sepulcre, 2005).

En las últimas décadas investigaciones en Europa y América Latina han enfocado su estudio hacia los mecanismos de degradación que afectan la piedra natural, ladrillos, hormigones y los materiales de reparación como morteros de cal o yeso, “morteros romanos” y morteros con base de cemento Portland. Algunos de los mecanismos de degradación que afectan frecuentemente los materiales son los ciclos de humedad-secado, la cristalización de sales y presión de cristalización, que trae como consecuencia desintegración granular y desarrollo alveolar como principales patrones de deterioro, los fenómenos de hielo-deshielo, el ataque de ácidos producidos por la contaminación ambiental y el contenido de arcillas expansivas dentro del material rocoso (María, 2014).

Históricamente los morteros de edificaciones patrimoniales son de matriz calcárea, es decir su conglomerante principal es la cal. Esto no quita que en ocasiones aparezcan morteros mixtos con yesos en exteriores, incluso en el caso de revestimientos, pero siempre supeditados a la presencia suficiente de cal o a tratamientos insolubilizantes o reductores de la higroscopicidad del yeso. Posteriormente la aparición del cemento Portland va desplazando a la cal aérea hasta su práctica desaparición, pero su uso en morteros y hormigones con el paso del tiempo evidencia la aparición de: ataque por sulfatos, reacción árido-álcali, formación de etringita retrasada, formación de eflorescencias salinas, aluminosis, etc. Lo que hacía que su durabilidad a edades largas no estaba garantizada. Después de

más de medio siglo de estudio sobre unas y otras alteraciones, a principio de los años 80, se produjo el importante cambio de pasar de la búsqueda de mayores resistencias como objetivo último en el desarrollo de los productos cementicios, a considerar la durabilidad a largo plazo como un objetivo tanto o más importante. El campo de la restauración de monumentos no fue ajeno a esta corriente, y así se fue cambiando paulatinamente el uso de la cal por el del cemento Portland, con los mismos problemas citados pero enormemente agravados por su relación y coexistencia con bases tradicionales de cal, más débiles y alteradas (Sepulcre, 2003).

Hoy en día conviven ambas tendencias, teniendo en la segunda un especial protagonismo el uso de adiciones de puzolanas como residuos cerámicos, la escoria de altos hornos, las cenizas volantes, el humo de sílice, etc. Los residuos de cerámica en polvo y en granos, proveniente de tejas criollas para la preparación de morteros era frecuente en el pasado. A lo largo del tiempo se verificó que la adición de partículas finas de cerámica a los morteros de cal aérea mejoraba sus características, debido a eventuales reacciones que providenciaban propiedades hidráulicas en los morteros. A pesar del conocimiento empírico existente en el pasado, los morteros con arcillas sujetas a tratamiento térmico, obtenidas a partir de la molienda de subproductos, demostraban un comportamiento duradero y fiable. Sus innumerables ventajas llevaron a un extenso periodo de utilización a lo largo de la Historia. La facilidad de encontrar estos morteros, en los días de hoy, en edificios históricos y sitios arqueológicos, es bastante reveladora de su durabilidad. En contacto con cal, el polvo de cerámica podrá actuar como puzolana en morteros, en la medida en que la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes en los elementos cerámicos reaccionan con el óxido de calcio de la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) llevando la formación de silicatos y aluminatos. El producto final, al contrario de lo que sucede con los morteros comunes apenas de base aérea, tienen la capacidad de endurecer en la presencia de agua, adquiriendo, por eso, hidráulicidad (Lourenço, 2014).

Con el propósito de buscar nuevas alternativas aplicables en el país, en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), desde el 2009 se realizan investigaciones sobre cementos con elevados porcentajes de sustitución de clínquer por arcillas calcinadas y caliza y se ha demostrado que además de la producción industrial, es posible producir a pequeña escala un cemento ternario de bajo carbono. Este cemento llamado LC3, se produce mezclando cemento P-35, polvo obtenido a partir de residuos de la producción de cerámica roja y piedra caliza. La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland (Aguilar, 2015).

**Situación problemática:**

En el país existen numerosas edificaciones con valor patrimonial que presentan un elevado porcentaje de deterioro de fachadas y muros, principalmente en los morteros de unión y revestimiento. La acción de conservación con morteros cuyo aglomerante principal es el cemento Portland no ha tenido resultados positivos, debido al uso de materiales inadecuados y no compatibles con los materiales históricos componentes de los muros. Provocando en ocasiones un agravamiento del deterioro evitando que la estructura desempeñe la función para la cual fue creada.

**Problema científico:**

¿En qué medida el empleo de cemento de bajo contenido de carbono (LC3) producido de forma artesanal a partir de la combinación de cemento P-35 con adiciones de polvo de cerámica roja y caliza en un 50% y 60%, influye en el comportamiento físico-mecánico de morteros de albañilería empleados en la conservación de edificaciones patrimoniales en Cuba?

**Hipótesis de investigación:**

El cemento de bajo contenido de carbono (LC3) producido de forma artesanal a partir de la combinación de cemento P-35 con adiciones de polvo de cerámica roja y caliza en un 50% y 60%, puede ser empleado en la elaboración de morteros de albañilería para la conservación de edificaciones patrimoniales en Cuba.

**Objetivo General:**

Evaluar el comportamiento físico-mecánico de morteros elaborados con cementos LC3 de producción local con sustituciones del 50% y 60% del cemento P-35 por una mezcla de polvo de residuos de cerámica roja y caliza para la conservación de edificios patrimoniales en Cuba.

**Objetivos específicos:**

1. Analizar antecedentes teóricos sobre el empleo de cementos con sustituciones de residuos cerámicos en morteros de restauración.
2. Realizar ensayos físico-mecánicos a los morteros elaborados a partir de cementos con residuos cerámicos, producidos localmente teniendo como patrón de

comparación el cemento PP-25 según la normativa cubana NC175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones.

3. Analizar la efectividad de la producción de morteros fabricados con cementos con residuos cerámicos para su uso en morteros de albañilería para la conservación de edificios patrimoniales atendiendo a los requerimientos establecidos en las normativas.

**Tareas científicas:**

1. Búsqueda bibliográfica que permita conocer el estado del arte de la temática a través de la revisión de la literatura más actualizada sobre el tema.
2. Selección y obtención de las materias primas a emplear.
3. Caracterización de las materias primas que se emplearán para la elaboración de los morteros.
4. Fabricación de morteros con aglomerantes producidos localmente, atendiendo a los requerimientos de la NC 175:2002 *Morteros de Albañilería. Especificaciones*.
5. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los morteros elaborados.
6. Análisis del comportamiento de los cementos con residuos cerámicos en los morteros de albañilería a partir de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

**Novedad Científica:**

Se demuestra que los cementos LC3 producidos localmente, utilizando sustituciones de 50 y 60% de residuos cerámicos y caliza, pueden ser utilizados como aglomerante fundamental para la ejecución de morteros de restauración, sin comprometer las propiedades mecánicas exigidas en la normativa vigente.

**Aporte Práctico:**

Se demuestra que los morteros con cemento LC3 producido artesanalmente y elaborado con residuos de cerámica-caliza con altos volúmenes de sustitución puede ser una alternativa económica y ambientalmente sustentable para nuestro país y validada para la conservación del patrimonio construido.

**Estructura de los capítulos:**

Capítulo 1: Marco teórico y metodológico.

Se realiza un análisis de las fuentes bibliográficas consultadas acerca de morteros históricos, sobre las puzolanas y su rol en los morteros de reparación. Se resumen las principales clasificaciones y propiedades de los morteros de albañilería y se presentan además los conceptos y definiciones fundamentales referidos al uso de cemento de bajo carbono, así como las potencialidades de los mismos en la fabricación de morteros de reparación.

Capítulo 2: Elaboración de morteros de reparación con cementos mezclados.

Se expone el trabajo experimental a partir del empleo de las dosificaciones planteadas en la NC175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones*. Se caracterizan las materias primas que se utilizan para la producción de los morteros y se explican los ensayos que permiten evaluar el comportamiento físico-mecánico de los morteros elaborados con cemento LC3 producido localmente.

Capítulo 3: Análisis de resultados.

Se exponen los resultados obtenidos en los ensayos físico-mecánicos a los morteros y se evalúa si cumplen las especificaciones de calidad establecidas en la norma NC 175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones*. Se lleva a cabo la comprobación de estos resultados con otras normas vigentes internacionalmente. Se evalúa si el cemento LC3 producido artesanalmente puede ser utilizado como aglomerante fundamental para la ejecución de morteros de restauración, sin comprometer las propiedades mecánicas exigidas en la normativa vigente.

Luego se presentan las conclusiones, las recomendaciones y los anexos del informe.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### 1.1. Morteros. Generalidades

Se puede definir como una mezcla constituida por el conglomerante y áridos finos que al adicionarle agua reacciona y adquiere resistencia. Puede estar compuesto eventualmente por aditivos químicos y adiciones que mejoran sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido y le otorgan características especiales como su plasticidad inicial, que permite trabajarla y moldearla según la necesidad, que lo hace útil como material de construcción. Son mezclas plásticas empleadas como material de asentamiento o unión de elementos, como material de recubrimiento o acabado de superficies y para la fabricación de piedras artificiales; siendo los de cal, de cementos y la mezcla de ambos (morteros bastardos) con arena natural los más empleados (Barrera et al., 2002b, Hernbostel, 2002, Lana, 2005, N.A, 2007)

La norma cubana (NC175, 2002) define por mortero a una mezcla de uno o varios conglomerantes, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos que sirve para unir elementos como ladrillos, bloques, celosías y otros, también sirve para revestimientos de paredes y techos.

#### 1.1.1. Clasificación de los morteros

Autores como (Álvarez, 2011, Blanco, 2012 ) plantean el mortero como material resultante de la mezcla íntima de un árido, ligante y agua, según la naturaleza del conglomerante se puede clasificar en:

Morteros de base cal: Están fabricados con hidróxido de calcio (cal), arena y agua. La cal puede ser aérea o hidráulica, se diferencian en que la hidráulica tiene un pequeño porcentaje de silicatos, lo que la hace más recomendable para su uso en ambientes húmedos. Estos tipos de morteros no se caracterizan por su gran dureza a corto plazo, sino por su plasticidad, color, y maleabilidad en la aplicación. Las propiedades de los morteros de cal están limitadas por el proceso de endurecimiento por lo que presentan baja resistencia mecánica, elevada capacidad de deformación, elevada permeabilidad al agua y al vapor de agua, ausencia de sales solubles, fácil laborabilidad debido al lento proceso de endurecimiento, elevada retracción y baja resistencia a los ciclos hielo/deshielo (Blanco, 2012 , Pérez, 2008).

Es una mezcla compuesta de cal aérea o hidráulica, arena y agua; pueden tener hasta un 5% de cemento blanco cuando se considere necesario y aditivos para mejorar algunas propiedades (NC566, 2007).

Morteros de base cal con puzolanas: definido por (Álvarez, 2011) como morteros plásticos, laborables, de porosidad media y resistencias mecánicas de baja a media. El tipo de cal y principalmente el tipo, finura y actividad de la puzolana influyen en la reactividad del cemento, ya que las puzolanas naturales y artificiales están formadas por silicatos o aluminosilicatos, que por sí solos carecen de propiedades cementantes y actividad hidráulica, pero que al unirse con la cal son capaces de reaccionar en presencia de agua, dando lugar a la formación de productos insolubles y estables, similares a los formados en la hidratación del cemento Portland, o sea, a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (Arriola, 2009).

Morteros basados en ligantes hidráulicos: Se definen por (Arriola, 2009) como productos artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que al ser amasados con agua forman una pasta que fragua obteniéndose compuestos estables que endurecen en el tiempo, siendo esta su principal propiedad. La cal hidráulica es uno de los primeros ligantes hidráulicos, aunque el principal es el cemento Portland.

Morteros mixtos o bastardos: Los morteros bastardos son aquellos en los que intervienen dos aglomerantes como por ejemplo cal y cemento y sirven para evitar la escasa trabazón, adherencia y alta porosidad de los morteros de cemento y arena con dosificaciones superiores a 1:5, presentando ventajas como endurecimiento bastante rápido, ausencia de grietas por retracción, aumento de la plasticidad, la compacidad y la adherencia. Este tipo de morteros sustituye ventajosamente al mortero de cal en aquellos casos en que el revestimiento está particularmente expuesto a sollicitaciones mecánicas y a la intemperie (Rodríguez, 2003).

Plantea (Álvarez, 2011) otra clasificación de los morteros, atendiendo al tipo de aplicación, en relación a la calidad de los cementos, en morteros de albañilería y morteros especiales.

Morteros para determinar la calidad de los cementos: son empleados para la evaluación de las resistencias mecánicas de los cementos.

Morteros de albañilería: son los morteros más empleados tanto en la colocación de elementos (ladrillos, bloques, rasillas, celosías, etc.) como en el revestimiento de edificaciones. En la (NC175, 2002) se plantean los requisitos que deben cumplir para ser empleados en obras de albañilería y los define como mezcla de uno o varios conglomerantes minerales, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos.

Morteros especiales: engloban varios tipos como morteros de cola, dentro del cual se encuentra el cemento blanco o gris, estos están conformados por áridos finos de naturaleza calcárea o silíceas, libres de arcillas y materias orgánicas, el mortero monocapa aplicado en varias capas sucesivas como el salpicado, resano y el fino. Los morteros aligerados, empleados como aislantes térmico y acústico, niveladores de pendientes, rellenos en cubiertas antes de colocar la soladura y en relleno de zanjas, otro de los integrantes de esta familia son los morteros poliméricos donde el conglomerante principal son polímeros y no el cemento, son empleados como revestimiento de cualquier soporte o paramento, fachadas, zócalos, cajas de escaleras, pasillos, entre otros (Álvarez, 2011, Lana, 2005, Mas, 2006).

La (NC175, 2002) los clasifica según el sistema de fabricación en:

Mortero preparado "in situ": Mortero compuesto por los componentes primarios, mezclados y amasados en el lugar de construcción.

Mortero industrial: Mortero dosificado y mezclado en la fábrica, que se suministra al lugar de construcción. Este mortero puede ser "mortero seco" que exige la adición y amasado con agua para su utilización o "mortero húmedo" que está retardado y se suministra listo para su empleo.

Mortero industrial semi-terminado: Material cuyos componentes se mezclan en fábrica y se suministran al lugar de construcción, en donde se mezclan y amasan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante.

### 1.1.2. Constituyentes de los morteros de albañilería

Los componentes principales de un mortero se clasifican según (Rodríguez, 2003) como:

**Conglomerante**: Es un material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que origina nuevos compuestos. Los conglomerantes utilizados en la fabricación de morteros son productos artificiales de naturaleza inorgánica y mineral. Se obtienen a partir de materias primas naturales y, en su caso, de subproductos industriales. Se distinguen dos tipos: cementos y cal.

*Cemento Portland*: Es el conglomerante hidráulico más empleado en la construcción debido a estar formado básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y fragmentos de roca que son materiales muy abundantes en la naturaleza (Acevedo Sánchez, 2013). Según Adam N. Neville referenciado por Becker (s.f.), "el cemento puede definirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar todo un compacto"; aunque a esta definición puede

agregársele que tiene la propiedad de fraguar cuando se mezcla con agua, debido a reacciones químicas durante la hidratación y de endurecer conservando su resistencia y estabilidad (Aguado Crespo, 1990, Arriola, 2009, Becker, n.d).

**Cal:** Pueden ser aéreas o hidráulicas según refiere la (NC54-285:, 1984).

La cal aérea hidratada (apagada) endurece únicamente con el aire. Esta cal, amasada con agua y expuesta a la acción del aire, primero fragua por cristalización del hidróxido cálcico y luego endurece al carbonatarse los cristales por acción del CO<sub>2</sub> atmosférico.

La cal hidráulica amasada con agua forma una pasta que fragua y endurece a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes.

Es empleada para producir adherencia más íntima y durable, hace a los morteros más plásticos y laborables y con alta capacidad de retención de agua. Además endurece muy lentamente y reacciona con el anhídrido carbónico de la atmósfera hasta volver a formar carbonato de calcio, del que originalmente proviene (Acevedo Sánchez, 2013, Barrera, 2002a, Hernbostel, 2002, Martínez, 1995).

**Áridos:** Los áridos que forman parte de morteros son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable. Su naturaleza se define como inerte ya que por sí solos no deben actuar químicamente frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos (aire, agua, hielo, etc.). Sin embargo, sí influyen de forma determinante en las propiedades físicas del mortero, al unirse a un conglomerante. En general, no son aceptables áridos que contengan sulfuros oxidables, silicatos inestables o componentes de hierro igualmente inestables (Acevedo Sánchez, 2013). La granulometría y distribución de los tamaños del árido tiene que ser variada de forma tal que favorezca la compactación y empaquetamiento entre partículas; para ello se deben evitar las formas planares de plaquetas y agujas porque influyen en la docilidad del mortero, las superficies lisas y redondeadas porque influirán en la adherencia con el aglomerante contrariamente a las superficies angulosas y rugosas que permiten mejor acomodación y adherencia del mortero. A mayor cantidad de granos finos menor será la resistencia y mayor la porosidad del mortero (Mas, 2006).

Las especificaciones de arenas empleadas para morteros se describen en la norma europea UNE EN 13139, y la norma cubana NC 657:2008.

**Agua:** El agua es el segundo componente fundamental del mortero. Se utiliza en el amasado y curado. Es el elemento indispensable para las reacciones de hidratación del cemento, actúa como lubricante haciendo posible la laborabilidad de la masa fresca y también es responsable de crear los espacios para los productos hidratados del cemento (Morejón, 2015). El agua empleada para la fabricación del mortero debe ser limpia y sin partículas

contaminantes como aceite, ácidos, álcalis y sales. Se emplearían, por tanto, aguas destiladas, desionizadas o, en el caso de aguas marinas, de ríos o embalses, se prestará atención a los contenidos de impurezas y sales (Mas, 2006).

**Aditivos:** Son componentes de naturaleza orgánica o inorgánica, cuya inclusión tiene como objetivo modificar las propiedades físicas de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones. Su utilización no debe exceder el 5% del peso del cemento. Su función principal es modificar alguna de las características del mortero, pudiendo tener además como función secundaria y accesorio de modificar alguna o algunas de las características de estos materiales, independientemente de que la defina la función principal (Morejón, 2015). Los aditivos más habituales en la fabricación de los morteros de albañilería son los aireantes, los plastificantes, retardadores del fraguado, hidrofugantes, retenedores de agua, etc. (Miravete et al., 2000)

**Adiciones:** Son sustancias inorgánicas, puzolánicas o con hidraulicidad latente, que finamente molidas, pueden añadirse al mortero en proporciones mayores con respecto a los aditivos. Tienen como función modificar algunas propiedades del mortero o reducir la cantidad de cemento a utilizar. Pueden ser materiales inorgánicos que, en pequeños tamaños de partículas y bajas proporciones, mejoran las propiedades hidráulicas de la cal (Mas, 2006).

### 1.1.3. Dosificaciones de los morteros de albañilería

La dosificación de un mortero, es la relación de cantidades entre sus componentes e influyen en sus propiedades finales, las proporciones de todos ellos, aunque a la hora de aislarlos para su estudio, se suelen separar la relación árido/conglomerante por un lado y la relación agua/conglomerante por otro. (Sepulcre, 2005) plantea que en los trabajos de campos es común que las dosificaciones se realicen en cantidades medidas por volumen, pero es mucho más exacto el uso de dosificaciones por peso. Esto, junto al grado de humedad contenido en la arena, no son problemas despreciables, y a menudo han dado lugar a confusiones.

En la tabla 1.1 se muestran los tipos de morteros según la NC 175:2002 Morteros de Albañilería. Especificaciones, la resistencia que deben cumplir estos a los 28 días de edad, así como la adherencia. Plantea además dosificaciones según el tipo de cemento.

**Tabla 1.1 Dosificaciones generales y propiedades de los morteros de albañilería.**

Tipos de mortero	Rc. 28d. (Mpa)	Adh.28d. (Mpa)	Tipos de cementos			Arena	Hidrato de cal
			P-350	PP-25	Albañilería		
I	2.4	0.15±0.05	1			8	2
				1		6	2
					1	4	1.5
II	3.5	0.25±0.05	1			6	2
				1		5	1
					1	4	1
III	5.2	0.40±0.05	1			4	2
				1		4	1
					1	3	1
IV	8.9	0.50±0.05	1			4	1
				1		4	0.5
					1	3	0.5
V	12.4	0.65±0.05	1			3	1
				1		3	0.5
					1	2.5	---

*Fuente: NC 175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones.*

#### 1.1.4. Propiedades de los morteros de albañilería

El mortero debe estar dotado de propiedades tales que produzca la máxima eficiencia a través de los diferentes estados por los que atraviesa. Dentro de las prestaciones que ofrece un mortero se distinguen dos etapas diferenciadas por su estado físico: estado fresco y estado endurecido. La primera responde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía en correspondencia con el tiempo de fraguado, así como por las condiciones ambientales. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra. Superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse. Es necesario subrayar que las características de los morteros, tanto en estado fresco como endurecido, dependen lógicamente de su aplicación de destino (Barrera, 2002a, Salazar, 2000, Sánchez, 2002).

#### 1.1.4.1. Propiedades en estado fresco

En su estado fresco el mortero presenta una serie de propiedades que regulan su comportamiento y son de importancia e incidencia en las propiedades y características en su estado endurecido (Barrera, 2002a).

Laborabilidad: Es la propiedad más importante del mortero fresco. Un mortero laborable puede extenderse fácilmente sobre paredes y juntas de la unidad de albañilería, es capaz de soportar el peso de las unidades cuando se colocan sobre él, facilitando su alineación y salir de las juntas cuando se aplica una presión sobre las mismas. Esta propiedad es el resultado de la lubricación de las partículas de áridos, mediante la pasta conglomerante y una buena laborabilidad es importante para propiciar la máxima adherencia en las unidades de albañilería. Es una compleja propiedad reológica y no existe un ensayo para cuantificarla por sí sola, razón por la que se emplea la consistencia, que mide la facilidad de colocación de la mezcla en las unidades de mampostería o en revestimientos. Puesto que la consistencia se adquiere mediante adición de agua a la masa de arena y conglomerante, esta propiedad se relaciona directamente con la proporción agua/cemento, crucial para el completo desarrollo de las propiedades resistentes del mortero. Se mide en el laboratorio por medio de la fluidez la cual indica el aumento del diámetro producido en una muestra de mortero extendido en la mesa de sacudidas (Álvarez, 2011, Barrera, 2002a, NC175, 2002, Sequeira, n.d).

Retención de agua: Es la capacidad de un mortero de mantener su laborabilidad cuando éste ha sido sometido a la succión de las unidades de albañilería y al proceso de evaporación, o sea, es la capacidad del mortero de retener el agua. Puede ser mejorada mediante la adición de cal, aditivos plastificantes y agentes inclusores de aire. Esta incide en la velocidad de endurecimiento y la resistencia final a la compresión del mortero. Cuando un mortero presenta buena retención de agua, es posible controlar el fenómeno de exudación que se produce debido a la presencia de materiales constituyentes con diferentes pesos específicos; los de mayor peso tienden a decantar y los más livianos como el agua asciendan, produciendo pérdida de esta y creando conductos capilares que afectan la impermeabilidad y debilitan la resistencia. Al asentarse los sólidos, la película superficial superior de la mezcla baja su resistencia y afecta así la adherencia entre mortero-unidad, produciéndose oquedades bajo el muro, influyendo además en la velocidad de endurecimiento y la resistencia final a la compresión del mortero (NC175, 2002, Sequeira, n.d).

Contenido de aire: puede producirse por efectos mecánicos o por medio de la aplicación de aditivos incorporadores de aire. Permite explicar el comportamiento en estado fresco y endurecido del mortero. A medida que aumenta el contenido en aire (12-18%, según ASTM

C-270), mejora la trabajabilidad y la resistencia a los ciclos hielo-deshielo, de forma contraria, disminuye la resistencia mecánica, la adherencia y la impermeabilidad (Barrera et al., 2002b, Sequeira, n.d).

Masa unitaria: indica la resistencia del mortero, si es muy densa la mezcla es probable que su resistencia sea alta, siendo esta propiedad un parámetro fundamental para obtener el contenido de aire atrapado en el mortero (NC175, 2002).

Tiempo de utilización: es el tiempo durante el cual el mortero tiene suficiente laborabilidad para ser manipulado sin necesidad de adición de agua (NC175, 2002).

#### **1.1.4.2. Propiedades en estado endurecido**

Retracción: producida por reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobre todo con una alta relación agua-cemento, donde el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones internas en el mortero dando lugar a los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. La retracción depende fundamentalmente de la relación agua/cemento, a mayor valor de la misma y mayor finura del cemento se obtienen mayores cambios de volúmenes, y es proporcional además al espesor de la capa de mortero y a la composición química del cemento (Courard et al., 2003).

Se distinguen según (AFAM, n.d) tres tipos de retracción: plástica, hidráulica o de secado y térmica.

Adherencia: es la propiedad que poseen los morteros de adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (piedras, ladrillos, acero, etc.). La adherencia del mortero depende de todas las características de este y de la superficie y naturaleza del material al que se adhiere. Esta es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que lo une con la estructura. Esta propiedad afecta en gran forma la permeabilidad y la resistencia a la flexión (Arriola, 2009, Morante, 2008). Existen dos tipos de adherencia según (Morante, 2008): química, basada en los enlaces, y física, fundamentada en el anclaje mecánico entre las piezas (adhesión).

Resistencia a flexión y compresión: es la propiedad empleada para añadir elementos de forma resistente, pues el mortero debe poseer una resistencia acorde con los elementos que debe unir. Se requiere una alta resistencia a la compresión cuando el mortero soporte cargas altas y sucesivas, siendo éstas un indicio de las resistencias a tensiones de corte y a tensiones de tracción (Courard et al., 2003).

La resistencia a la compresión aumenta con el incremento del contenido de cemento y disminuye con el aumento de la cal, arena, agua y contenido de aire. Medida a los 28 días es

generalmente usada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción del mortero (NC175, 2002).

Durabilidad: es la condición por la cual estos deben mantener sus propiedades a través del tiempo y de resistir las acciones destructivas provocadas por los agentes externos como las bajas temperaturas, la penetración del agua, desgaste por abrasión, retracción al secado, eflorescencias, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones físico-químicas con el tiempo. La durabilidad resulta muy afectada por un exceso de arena y un reemplazo del mortero así como por el uso de unidades de albañilería de alta absorción (Blanco, 2012 , NC175, 2002, Sequeira, n.d).

Permeabilidad: es la propiedad del mortero que permite el paso de agua a través de su estructura interna por medio de dos mecanismos: presión hidrostática o capilaridad. Los morteros trabajables y uniformes pueden hacer que la mampostería sea más resistente a la permeabilidad de agua. Esta propiedad se ve afectada por factores como la adherencia entre el mortero y las unidades de mampostería (Barrera, 2002a, Salazar, 2000).

Absorción de agua: Esta propiedad depende de la estructura capilar del material, por cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y menor absorción presentará y su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad del mortero, de forma tal que si el mortero es permeable al agua, se transmite esta hacia su interior originando la aparición de humedades por filtración (AFAM, n.d).

#### **1.1.5. Métodos de ensayo para la evaluación de morteros de albañilería**

Las propiedades de los morteros resultan determinantes para averiguar si éstos se adecúan a las exigencias o usos que se les vayan a dar. Para la evaluación de las mismas, se realizan ensayos físicos, mecánicos y de durabilidad en relación con el estado del mortero: estado fresco y estado endurecido. Las propiedades específicas que deben cumplir los morteros de albañilería se establecen en las normas vigentes de cada país, a continuación se explican cuáles son los métodos y ensayos utilizados para su determinación y evaluación.

Densidad aparente: Se determina a los morteros de albañilería en varios estados: polvo seco, fresco y endurecido. En estado de polvo seco la densidad ( $\rho_m$ ), en  $\text{kg/m}^3$  de un mortero seco es el cociente de la masa ( $m$ ) en kg y el volumen ( $V_v$ ) en  $\text{m}^3$ , que ocupa un mortero, cuando se introduce no compactado en un recipiente de una capacidad dada (NC567, 2007). En morteros frescos, se determina su densidad aparente dividiendo su masa por el volumen que ocupa cuando se introduce, o se introduce y compacta, de una manera

prescrita en un recipiente de medida con capacidad dada (NC601, 2008). En estado endurecido, se divide la masa de una probeta en seco, ya sacado de la estufa, por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua en estado saturado. Las probetas con mayor densidad real y menor densidad aparente son las que tienen mayor volumen de porosidad y mayor intercomunicación entre poros (NC-EN1015-10, 2008).

Fluidez: La fluidez está estrechamente ligada con la laborabilidad, consistencia, plasticidad y es una forma de medir las condiciones que debe poseer un mortero para su utilización en obra. La laborabilidad se mide en el laboratorio por medio de la fluidez, la cual indica el aumento del diámetro producido en una muestra de mortero fresco moldeado en un molde tronco-cónico de dimensiones determinadas, cuando la mesa de sacudidas se eleva y se deja caer desde una altura de 12,7 mm 25 veces en 15 segundos, girando la manivela con una velocidad constante. La fluidez recomendada para los morteros de albañilería y determinada por la norma cubana NC 170:2002 y la norma europea UNE 83-811:1992, será de  $190 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  de diámetro (NC175, 2002).

Retención de agua: La capacidad de retención de agua de una muestra se determina por la cantidad de agua retenida en el mismo después de la succión; se expresa en el porcentaje de agua retenida en el mortero. El método para determinar la retención de agua se basa en someter la masa de mortero fresco a un tratamiento de succión, empleando papel de filtro como sustrato. Los métodos de referencia para determinar la capacidad de retención de agua de los morteros en sus diferentes estados se establecen en la NC 169:2002, y su valor no será menor del 90 % (NC175, 2002). Resultados obtenidos en laboratorios demuestran que la retención de agua se incrementa con la adición de cal, la incorporación de aire, la adición de arena fina y utilizando aditivos retenedores de agua.

Resistencias mecánicas: Con el ensayo de resistencia mecánica se determinan las resistencias que son necesarias para juntas de colocación y revestimientos, además de ser utilizado como patrón de la resistencia a la adherencia, ya que ambas son relativamente proporcionales. Los ensayos mecánicos se realizan por la norma cubana NC 173:2002 y la norma europea UNE-EN 1015-11:1999 y tienen como principio del método la determinación de la resistencia a flexión y compresión en probetas prismáticas de (40x40x160 mm). De acuerdo a los cinco tipos de morteros según la norma cubana NC 175:2002, la resistencia a compresión a 28 días de edad exige valores mínimos que oscilan entre 2,4 - 12,4 MPa.

Absorción capilar: La absorción de agua por capilaridad es una propiedad que se produce al existir diferencia de presión dentro de los capilares lo cual provoca que el agua ascienda por su interior. A más fino y largo el capilar la absorción será mayor. Los ensayos de absorción

capilar se realizan por la NC 171:2002, y también por la norma europea UNE-EN 1015-18:1999. Consiste en medir el aumento de peso por unidad de superficie que experimentan las probetas con dimensiones de (40x40x160 mm) por efecto del agua absorbida por capilaridad cuando se las sumerge por una de sus bases menores de (40x40 mm) hasta la altura de  $5 \pm 1$  mm. Las probetas son pesadas antes de ser colocadas en el agua y a las edades de 4 h; 8 h; 1; 3; 5 y 7 días.

Adherencia: Se presenta en los morteros tanto en estado fresco como endurecido. La adherencia en estado fresco se debe a las propiedades reológicas de la pasta de cemento y/o cal; se puede comprobar aplicando mortero entre dos elementos a unir (ladrillos, bloques, etc.) y separándolos al cabo de cierto tiempo. Si el mortero permanece adherido a las dos superficies, existe buena adherencia, si se desprende con facilidad y no deja apenas señales en ambas bases, la adherencia es mala. En estado endurecido, se define como la resistencia a tracción máxima de la unión entre un mortero y un soporte definido; se determina por un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero. La fuerza de tracción se aplica por medio de una chapilla de arrancamiento unida al área de ensayo de la superficie del mortero (NC172, 2002).

Estabilidad de volumen (retracción): La determinación de la retracción consiste en medir mediante un pie de rey, en mm, la disminución de volumen que ha tenido lugar entre el amoldado del mortero en las probetas y el final de fraguado, también se puede determinar por la norma UNE 80-112-89 y ASTM C 490-83a. Según las normas mencionadas establece que es el proyectista quien fija los requisitos de contracción del mortero en función a las condiciones de ejecución de las albañilerías y de exposición durante su vida útil estableciendo si es necesario la realización de ensayos de cambio de longitud (Sánchez et al., 1997).

Permeabilidad al agua: El método para su evaluación se puede determinar tanto en laboratorio como *in situ*, permite caracterizar el material y por comparación apreciar modificaciones o alteraciones superficiales que modifican la absorción de agua sobre el nivel superficial; define el efecto sobre el tratamiento de impregnación cambiando la permeabilidad superficial; caracteriza el efecto de la intemperie, además aprecia el efecto del tiempo natural o artificial (aparato simulador) por una impermeabilidad o tratamiento impermeable o por tratamiento de impregnación (Álvarez, 2011). La literatura técnica indica que existen diversos ensayos que pueden realizarse para este objetivo, entre los cuales los más importantes y eficaces son: el ensayo normalizado en la norma ASTM E 514-90, que mide la penetración de agua a un caudal y presión constantes aplicados por medio de una cámara en la

superficie del muro; el ensayo de aspersion directa basado en la norma ISSO 335-3931, y por las indicaciones de la norma europea UNE-EN 1015-19:1999.

Permeabilidad al aire: Para su medición se emplea el “Método Torrens”, método no destructivo creado hace alrededor de 18 años e incluido como norma suiza en 2003, para medir la calidad de los hormigones sin afectar la integridad de las estructuras, pero es aplicable a morteros de albañilería. En este método la geometría del problema está definida mediante un modelo teórico que hace el cálculo del coeficiente de permeabilidad ( $k_t$ ). Se clasifica así la permeabilidad al aire del hormigón o mortero en dependencia del valor que tome  $k_t$  en muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (Peraza Abreu, 2014, Torrens, 1995).

Porosidad abierta: La porosidad abierta define el porcentaje del volumen de huecos intercomunicados con respecto al volumen total de la roca. El ensayo se realiza según la recomendación (RILEM-I1, 1980). Es una propiedad fundamental de las rocas y materiales de construcción, que influye en su durabilidad. Las probetas se colocan en un recipiente y se vierte agua destilada a temperatura ambiente, que se añadirá lentamente para que las probetas no queden completamente sumergidas antes de 15 minutos. Numerosos procesos de alteración dan lugar a un aumento de la porosidad del material, mientras que los tratamientos de impregnación la reducen (Mas, 2006).

Durabilidad: Para determinar la tendencia de durabilidad del mortero se encuentran: ensayos al intemperismo, cristalización por inmersión total, método humedad-secado por la norma europea UNE 67-034-86, absorción por capilaridad, entre otros.

Según la norma cubana NC 175:2002 una de las formas de evaluar la durabilidad es mediante el ensayo de intemperismo, por medio del cual, se mide la acción combinada de todos los elementos de la naturaleza que afectan al mortero y que pueden llegar a destruirlo a largo plazo (Álvarez, 2011).

#### **1.1.6. Normas de especificaciones de calidad y ensayos a los morteros**

La normalización o estandarización es la redacción y aprobación de normas que se establecen para garantizar el acoplamiento de elementos construidos independientemente, así como garantizar la calidad de los elementos fabricados, la seguridad de funcionamiento y para trabajar con responsabilidad social. Regula y unifica las dimensiones, calibres y calidades de los productos industriales y del proceso de producción de los mismos a una norma, para racionalizar y uniformar la fabricación. Varias normativas cubanas de ensayos a morteros de albañilería se apoyan en los procedimientos y ensayos de las normativas europeas citadas a continuación.

**Normas europeas:**

- UNE-EN 998-2: Morteros para albañilería.
- UNE-EN-1015-1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).
- UNE-EN-1015-2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.
- UNE-EN-1015-3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).
- UNE-EN-1015-4: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por penetración del pistón).
- UNE-EN-1015-6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.
- UNE-EN-1015-7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.
- UNE-EN-1015-9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.
- UNE-EN-1015-10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.
- UNE-EN-1015-11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- UNE-EN-1015-12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes.
- UNE-EN-1015-17: Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos.
- UNE-EN-1015-18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos.
- UNE-EN-1015-19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.
- CEN/TC 125: Proyecto de normas europeas. Morteros. Albañilería y Revestimiento, en estudio.

**Normas cubanas:**

- NC 169:2002 Mortero fresco. Determinación de la capacidad de retención de agua.
- NC 170: 2002 Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas.
- NC 171:2002 Morteros de albañilería. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- NC 172:2002 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción.

- NC 173:2002 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.
- NC 175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones.
- NC 567:2007. Mortero seco en polvo. Determinación de la densidad aparente.
- NC 601:2008. Morteros de albañilería. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco (EN 1015-6:1999, MOD).
- NC 657:2008 Áridos para morteros. Especificaciones.
- NC 791:2010. Código de buenas prácticas sobre la preparación, dosificación, mezclado y colocación de los morteros de albañilería.
- NC-EN 1015-10: 2008. Morteros de albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido (EN 1015-10:1999, IDT).

## 1.2. Adiciones puzolánicas. Generalidades

El uso de la cal ha llevado asociado desde la antigüedad la adición de sustancias modificadoras de su comportamiento a corto y largo plazo. Entre ellas, unas de las más importantes son las puzolanas, nombre genérico con el que se denomina a un conjunto de productos con características comunes, aunque de muy diversa composición y procedencia (Acevedo Sánchez, 2013, Morejón, 2015).

Las puzolanas se definen como materiales carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por si solos, pero contienen constituyentes que se combinan con la cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos (Orrala Yagual and Gómez Suárez, 2015, Sepulcre, 2005). Es decir, que pueden formar silicatos y aluminatos de cal, capaces de fraguar por hidratación.

### 1.2.1. Clasificación de las puzolanas

Según (Martirena, 2015, Megat, 2011, Morales, 2010, Orrala Yagual and Gómez Suárez, 2015, Salazar, 2002) las puzolanas se clasifican en:

#### Puzolanas naturales

- Puzolanas naturales de rocas volcánicas: Materiales cuyo principal constituyente es un vidrio amorfo producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo, las cenizas volcánicas como: la piedra pómez, las tobas, la escoria y obsidiana.
- Puzolanas naturales de rocas o suelos: Materiales cuyo constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de

organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

#### Puzolanas artificiales

- Cenizas volantes: De manera general, son las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: Por ejemplo, residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 900 °C.
- Escorias de fundición: Principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.
- Cenizas de residuos agrícolas: La ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar, cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión (temperaturas entre 500 °C. – 700 °C.).

#### **1.2.2. Fundamentos de la actividad puzolánica**

Hoy en día las aplicaciones principales de las puzolanas van, desde su uso como sustitutivo de una porción del cemento portland en morteros y hormigones, por su menor coste energético y tecnológico, hasta la posibilidad de eliminación de residuos industriales y el aprovechamiento de sus efectos beneficiosos en la durabilidad de morteros u hormigones, pasando por el renovado interés de estos productos en el terreno de la restauración del patrimonio histórico.

Para (Sabir et al., 2001), aunque hay varias teorías explicativas de la reactividad de las puzolanas, está universalmente aceptado que la principal reacción cementicia viene propiciada por la disolución del sílice vítreo/ amorfo, produciendo sílice en disolución, que reacciona con el CH para formar gel CSH. La alúmina también se disolverá en el medio con alto pH. Una pequeña cantidad se incorporará al gel CSH, pero la mayoría reacciona para formar fases CAH y CASH, normalmente cristalinas, las cuales pueden contribuir al proceso de cementación y a su resistencia. El grado de solubilidad dependerá de la superficie específica, que es el factor principal dentro de los diferentes procesos producidos por las distintas puzolanas, respecto al tiempo necesario para producir el desarrollo de resistencias en el hormigón. En el caso de hormigón que incorpore desechos de cenizas volantes (CV)

como sustitutivo parcial del cemento, por ejemplo, la resistencia inicial será menor que la del hormigón de control. Esto es debido a la reducción en contenido de cemento, y el bajo coeficiente de disolución de la sílice producido por la relativamente baja superficie específica de las CV (usualmente 300-400 m<sup>2</sup>/Kg). Con el tiempo, sin embargo, la mayoría de la sílice se disuelve, y entonces en la reacción se forma gel CSH adicional, que conduce al aumento de las resistencias a largo plazo.

(Rabilero, 1998), afirma que la actividad puzolánica de un material no depende de su composición química, aunque las puzolanas se caracterizan por un elevado contenido en componentes ácidos: esencialmente SiO<sub>2</sub>, así como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y FeO<sub>3</sub>. En otros casos la actividad puzolánica ha sido relacionada con su solubilidad frente al ataque ácido base, aunque las impurezas puedan dar lugar a errores. En cuanto a las reacciones puzolánicas, (Rabilero, 1998) afirma que transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos, y marcada influencia de la temperatura y la granulometría de las puzolanas. Por ello, la velocidad de reacción de cualquier puzolana con el CH, en presencia de agua, será tanto mayor cuanto menor sean las dimensiones de las partículas de aquella.

Para (Sepulcre, 2005), en el caso de las puzolanas, como el metacaolín (MK), las CV, el humo de sílice densificado (HSD), las cenizas de cascara de arroz (CCA), las cenizas de cascara de avellana (CCAv), y las cenizas de paja de trigo (CPT) es realmente la presencia de álcalis la que le otorga las propiedades cementicias a la puzolana.

De forma general según (Porto, 2005) el desempeño de una puzolana dada en el concreto depende de factores tales como la composición química, el índice de actividad puzolánica, el contenido de la sustitución, diámetro medio, forma y densidad del material puzolánico además de la proporción de materiales, la relación agua / cemento, tipo de cemento, el tipo de agregados, aditivos químicos, la edad y el grado de hidratación del hormigón.

### **1.2.3. Métodos de análisis de la actividad puzolánica**

Para calificar la actividad puzolánica, los materiales deben presentar características básicas como son reaccionar con el Ca (OH)<sub>2</sub> a temperatura ambiente durante un tiempo no muy largo y formar compuestos aglutinantes e insolubles en agua, similares a los obtenidos en la hidratación del cemento Portland. Los métodos empleados comúnmente para determinar la actividad puzolánica pueden ser directos, con el análisis de la evolución de los productos hidratados de la pasta de cemento por difracción de rayos X (DRX), termogravimetría (TG) y

el método Chapelle. O pueden ser indirectos, muy usual con la medida del desarrollo de la resistencia mecánica en el tiempo, y debidamente normalizado (Evangelista, 2011).

#### **1.2.4. Efectos de las puzolanas en las propiedades de ingeniería**

La laborabilidad es la propiedad más importante de los morteros en estado fresco, (Lourenço, 2014) concluye que la incorporación de partículas finamente divididas en el hormigón fresco, que muestra una tendencia a la segregación y la exudación, generalmente mejora la laborabilidad mediante la reducción del tamaño y volumen de huecos. Las escorias de la industria siderúrgica también le aportan mayor laborabilidad al mortero (Alujas, 2010, Salazar, 2000).

En sus estudios, (Turanli et al., 2005) observó el aumento de la relación agua/cemento requerida con el aumento del contenido de puzolana añadido para la obtención de la consistencia normal de las pastas de cemento, concluyendo que un aumento de 35% a 55% del contenido en la mezcla resultó en aproximadamente en un aumento del 14% de agua para alcanzar la referida consistencia.

Los morteros en la mayor parte de sus aplicaciones deben actuar como elemento resistente por lo que la resistencia a compresión es una propiedad fundamental. Respecto a la influencia de la adición de puzolanas, autores como (Porto, 2005) estudiaron la resistencia a la compresión de morteros que contienen residuos de ladrillos quemados molidos y MK como reemplazo parcial del cemento Portland observando un aumento para todos los porcentajes de sustitución utilizados. El aumento de la resistencia varió de 27% a 39% para el caso en el que se utilizó el primero y 21% a 72% para el segundo. En ambos casos se obtuvo la resistencia máxima con un nivel de sustitución de 18%.

En general, se ha encontrado que el uso de puzolanas como materiales sustitutivos parcialmente del cemento en el hormigón, produce una mayor densificación con reducción de los índices de difusión de gases e iones y consiguientemente una mejora de la durabilidad. El uso de MK, producto de la deshidratación del caolín y compuesto por óxidos silícicos y aluminosos en altas proporciones que, junto a la elevada superficie específica del producto final confieren al mortero una mayor impermeabilidad, una considerable reducción de la porosidad capilar, una gran resistencia química y una mejor y más rápida adquisición de resistencia mecánica. Otra adición a citar es la cerámica molida, se obtiene mediante la trituración a diferentes tamaños de cerámica, proporcionando una mejor propiedad hidráulica, durabilidad y resistencia mecánica de los morteros (Alujas, 2010, Salazar, 2000).

### **1.3. Morteros para la conservación de obras arquitectónicas. Generalidades**

Los morteros, al igual que cualquier material de restauración que entra a formar parte de un edificio o monumento en una intervención arquitectónica, según (Reira and Gonçalves, 2010) no debe dañar al elemento arquitectónico intervenido ni modificarle sus propiedades así como tener características y propiedades similares a las del mortero original. No debe modificar la estética inicial del elemento arquitectónico, ha de ser durable en el tiempo y su interacción con los agentes ambientales no puede causar ningún tipo de alteración en el conjunto arquitectónico. Del análisis de estas condiciones, se deduce la necesidad de llevar a cabo un estudio previo del elemento arquitectónico que se pretende restaurar, recabando toda la información necesaria de sus materiales originales y las técnicas empleadas en su construcción, así como anteriores intervenciones llevadas a cabo (Reira and Gonçalves, 2010).

Siempre que se introduce un mortero en la conservación de una obra arquitectónica hay que analizar la interacción mutua (debido a que la base es un material diferente del mortero de restauración) y su comportamiento frente a los agentes de deterioro de cualquier tipo. Será siempre recomendable que el mortero de restauración sea de comportamiento semejante al original (las diferencias grandes siempre acarrearán problemas), pero con pequeños cambios de comportamiento (Aguilar et al., 2014).

#### **1.3.1. Requerimientos de los morteros de restauración**

Los morteros destinados a la conservación de edificios antiguos tienen como principal función la protección de los soportes donde son aplicados. Es esencial que sean compatibles con los materiales existentes en el edificio. Esta compatibilidad es compleja y envuelve diversos aspectos, tanto en términos mecánicos (choque, erosión), como del punto de vista físico (absorción capilar, permeabilidad al vapor) y químico (sales solubles). (Becher, 2013) plantea que es fundamental que cumplan determinados requisitos como son: no contribuir a la degradación de los materiales preexistentes, fundamentalmente las mamposterías antiguas, proteger las paredes de las acciones externas y ser reversible, o por lo menos reparable. Además, tienen que ser durable (y contribuir a la durabilidad del conjunto) y no perjudicar la presentación estética y visual de la arquitectura.

Es necesario dedicar mucha atención a los requisitos o criterios de fabricación de los morteros de restauración como compatibilidad físico química, reversibilidad, similitud estética, etc. La compatibilidad físico química puede entenderse como la exigencia de cierta afinidad compositiva o de igualdad literal, o como evitar posibles efectos inadecuados por el

comportamiento del material añadido. Mientras que la reversibilidad que tanto se exige a la restauración como criterio indiscutible a menudo no solo es imposible sino que tampoco es deseable, como ante el caso de situaciones de inminente colapso estructural (Sepulcre, 2005).

#### **1.3.1.1. Reversibilidad**

Reversibilidad significa poder dar marcha atrás al proceso de actuación para volver a la situación original, anterior a la intervención. Por eso, es fácil de comprender que la reversibilidad absoluta no existe prácticamente en ninguna restauración, y menos en los trabajos de rejuntado o inyección. En estos casos, suele considerarse equivalente a 'inocuidad', es decir se considera suficiente, que no produzca alteraciones de la base original y, solo en caso de rejuntados, la posibilidad de eliminar los morteros nuevos causando el menor daño posible a lo histórico. Sólo en ese sentido, se consideran preferibles los morteros más débiles y con poca adherencia. Es evidente la contradicción que esto supone frente a los requisitos de estabilidad y durabilidad de los materiales de intervención, y devolución de la capacidad mecánica estructural al muro restaurado, por lo que todo se reduce a una solución de compromiso, a medio camino entre uno y otro supuesto (Sepulcre, 2005).

#### **1.3.1.2. Compatibilidad**

Los morteros de restauración deben tener características lo más parecido posible a aquellas de los materiales a reparar. Surgen limitaciones de la diferente tecnología de producción actual de las materias primas usadas, como la temperatura de cocción de los ladrillos, la calidad de la cal, etc., para la preparación de los morteros de restauración. Los morteros de restauración nuevos, no son capaces de asegurar su compatibilidad con las edificaciones antigua a causa del empleo de cemento y compuestos de base polimérica. En particular, el extenso uso del cemento durante la restauración ha creado daños irreversibles a las edificaciones históricas debido a su incompatibilidad mecánica y fisicoquímica con la estructura original. En el campo de la restauración el uso del cemento Portland se considera inadecuado debido a su irreversibilidad, elevada resistencia, alta rigidez, impermeabilidad, retracción del fraguado, producción de sales, alta conductividad térmica y textura característica (Becher, 2013, Sepulcre, 2005).

En el proceso de formulación de los morteros de reposición según (Kanan, 2009) las principales propiedades que deben tener para ser compatibles con la mampostería sobre la

que se aplicarán son: apariencia visual similar para conservar la apariencia e integridad del edificio, propiedades mecánicas no mucho mayores y módulo de elasticidad y deformabilidad similares para no originar tensiones y producir grietas, buena adherencia, buena laborabilidad, permeabilidad y microestructura similares para mantener las características hídricas frente al eventual deterioro por diversos factores como sales solubles y sin perder sus características como material de sacrificio para protección de la estructura (Porta, n.d).

#### **1.3.1.3. Propiedades mecánicas**

Los edificios históricos, independientemente del uso que se le vaya a dar en la actualidad o en el futuro, deben ofrecer estabilidad estructural, desde la perspectiva del riesgo de vidas humanas, en primer lugar, y de su propia integridad o subsistencia, en segundo. La evaluación del estado estructural de varios edificios históricos, ha mostrado que para algunos de ellos la seguridad estructural parece ser muy baja, capaces de derrumbarse a causa de ligeros terremotos o vientos fuertes. Por lo que el requerimiento principal debe ser la capacidad de mejorar la estabilidad estructural de la obra o al menos no empeorarla (Sepulcre, 2005).

#### **1.3.1.4. Durabilidad**

A pesar de que el mortero representa un pequeño porcentaje de la mampostería, su influencia en el comportamiento estructural es significativa; su calidad y comportamiento es tan fundamental como la calidad de la unidad de soporte. Como todos los materiales, los morteros sufren desgaste con el paso del tiempo debido a múltiples factores degradantes (Cañón 2012, Prado et al., 2009). Estos deben ser suficientemente duraderos para resistir las condiciones de exposición local, manteniendo no solo la integridad estructural durante al menos su vida útil, sino el aspecto externo, teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales, así como agresivas y de mantenimiento y el diseño constructivo (CEMCO, 2007).

#### **1.3.2. Conglomerantes empleados en la conservación de morteros históricos**

El estudio de las técnicas constructivas de las edificaciones históricas, revela que el conglomerante principal, antes del siglo XIX, fue el mortero de cal. Pero la utilización indiscriminada y sistemática de los morteros de cemento en obras e intervenciones de conservación y restauración del patrimonio arquitectónico, rompió con la técnica milenaria de la cal, capaz de preservarlo y transmitirlo durante cientos de años (Reira and Gonçalves, 2010). En España la cal es utilizada como material de construcción indispensable en el

campo de la restauración, utilizando el óxido cálcico de alta calidad que se produce en el país y apagándolo mediante sistemas tradicionales para la confección de pastas y morteros compatibles con el sistema constructivo original (Pérez, 2012).

Una alternativa para la restauración de los morteros de los muros de las edificaciones antiguas es el empleo de morteros elaborados con mezclas de cal apagada y materiales puzolánicos, ya que adquieren propiedades hidráulicas y se obtienen morteros resistentes a la acción del agua (CEMCO, 2007). La adición de materiales puzolánicos tiene elevado impacto en la industria de producción de cemento, ya que al emplearlos en la elaboración de morteros se disminuye el contenido de cemento en la mezcla. La utilización de cementos mezclados con altos porcentajes de sustitución de clínquer por materiales puzolánicos en morteros de reparación, disminuye la cantidad de clínquer a emplear en la elaboración del cemento y contribuye a un ahorro significativo de energía, a una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y, consecuentemente, un acercamiento a las formulaciones de morteros tradicionales que son capaces de respetar más el patrimonio histórico construido (Arriola, 2009).

#### **1.4. Cemento de bajo contenido de carbono (LC3)**

El cemento de bajo contenido de carbono (LC3) es una nueva tecnología surgida en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) que tiene la tarea de hacer frente a la creciente demanda de los recursos y al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental, utilizando la infraestructura existente disponible. Este nuevo conglomerante es un cemento ternario, y en su producción se reduce considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub> (hasta 50%) y al mismo tiempo muestra propiedades similares al cemento Portland. Esto se logra mediante la sustitución de parte del clínquer por una combinación sinérgica de arcilla calcinada y piedra caliza, esta calcinación ocurre a temperaturas más bajas que la requerida para la obtención del clínquer lo que conlleva a ahorros de combustible. La novedad y el potencial del LC3 residen en el efecto sinérgico de arcillas calcinadas y piedra caliza en términos de resistencia a las proporciones de mezcla específicas (Alujas, 2010, Castillo, 2010, Fernández, 2013, Martirena, 2003, Mena, 2013, Pérez Cabrera, 2013, Scrivener, 2008).

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

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

#### **1.4.1. Cementos ternarios con arcillas calcinadas**

Los sistemas ternarios a base de cemento, cal y puzolanas se basan en la suposición de que a mayor sustitución de cemento Portland, disminuye la cantidad de iones  $\text{Ca}^{2+}$  que se encuentran en la solución de agua de los poros, producida por la hidratación del cemento Portland, reduciendo la posibilidad de que tenga lugar la reacción puzolánica (Martirena, 2011). Actualmente se están desarrollando estudios sobre sistemas ternarios a base de cemento Portland–arcillas calcinadas (metacaolín)-caliza. Este material cementante suplementario es un aluminosilicato activado térmicamente a temperaturas con rango entre los  $500^{\circ}\text{C}$  y  $900^{\circ}\text{C}$  (metacaolín). Ha sido demostrado en estudios recientes que el metacaolín puede sustituir cemento en una proporción de hasta un 30%. Su empleo mejora la resistencia y la durabilidad del hormigón significativamente e incrementa la superficie específica de los cementos, logrando una baja porosidad y un aumento considerable de la resistencia mecánica (Antoni, 2013, Martirena, 2011).

La piedra caliza molida es una fuente barata y ampliamente disponible de mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Cuando las adiciones son en el orden del 5% de clínquer, el cemento resultante exhibe propiedades iguales o ligeramente superiores debido al aumento de compacidad. Cuando la adición está entre 10% y 15%, los efectos resultantes son negativos (Martirena, 2011).

El metacaolín ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), resultado de la activación térmica de arcillas caoliníticas, se ha estado investigando como material puzolánico en las últimas décadas. Considerado como un material cementante suplementario. En fecha reciente (Antoni, 2012), publicó un estudio donde se demuestra que hasta el 45 % de sustitución se obtienen resistencias mecánicas superiores al CPO desde edades tempranas e incluso, para sustituciones del 60 % se logra el 93 % del rendimiento con respecto al CPO.

#### **1.4.2. Producción local de LC3**

Según estudios realizados por Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se ha

demostrado que es posible producir a pequeña escala, un cemento ternario de bajo carbono. La producción local de cemento de bajo carbono se puede llevar a cabo en talleres artesanales que cuenten con la maquinaria y la infraestructura adecuada para acopiar las materias primas, producir el cemento y posteriormente almacenarlo de forma segura. La mezcla y el molido de las materias primas se realizan en molinos de bolas tanto de operación discontinua como continua (Aguilar, 2015). Este cemento se produce mezclando cemento P-35, polvo obtenido a partir de residuos de la producción de cerámica roja y piedra caliza. La proporción es de 50% de cemento P-35, 30% de polvo de cerámica roja y 20 % de caliza. La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland. Esta reacción da lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos) (Castillo, 2010).

#### **1.4.3. Propiedades del cemento LC3**

El potencial, la eficiencia y la sostenibilidad del LC3 se encuentran aún en estudio, registrándose resultados exitosos para la resistencia a la compresión y la absorción de agua en las producciones de bloques, baldosas y hormigones no estructurales (Fernandez Lopez, 2009).

Ensayos realizados por (Aguilar, 2015) con la utilización de cementos LC3 producido artesanalmente en la fabricación de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción alcanzada, constituyendo así una viable alternativa para nuestro país. Contribuye además en la mitigación de la contaminación ambiental con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en comparación con el cemento Portland. Su potencial se evidencia en el efecto sinérgico entre la arcilla calcinada y la caliza que permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland dando lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos) (Castillo, 2010).

Los hormigones elaborados con LC3 de producción local requieren de mayor cantidad de agua y/o aditivo superplastificantes 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 cemento posean una mayor superficie específica y mayor demanda de agua (Aguilar, 2015, Martirena, 2015).

Los beneficios y diferencias del nuevo sistema cementicio son innumerables y seguirán contando a medida que prosperen las investigaciones que a él se le atribuye. 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 clínquer de más del 45% comienza a decaer el pH del material dando lugar a procesos de carbonatación y futuras corrosiones del acero de refuerzo (Alvarez Ibarra, 2014, Mathieu, 2013).

#### **1.4.4. Aplicaciones e importancia del cemento LC3**

El cemento de bajo carbono producido artesanalmente tiene como ventajas el aprovechamiento de las fuentes locales de materias primas, fundamentalmente desechos de la producción de rasillas y ladrillos. La producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales y grandes ciudades, así como los bajos costos de inversión inicial y recuperación rápida de esta. Este conglomerante puede ser utilizado en morteros de albañilería, estabilización de suelo en bloques prensados, producción de prefabricados ligeros de hormigón de pequeño formato y en la elaboración de hormigón masivo de baja resistencia (Martirena, 2015).

Según (Alvarez Ibarra, 2014) se han producido en Cuba alrededor de 143 130 toneladas de LC3 y en una segunda etapa, 11 000 bloques huecos de hormigón se han producido con éxito con el empleo de este nuevo cemento. Estos bloques cumplen con las normas de resistencia y absorción de agua, por lo que se utilizarán para la construcción de estructuras con diferentes fines investigativos.

#### **1.4.5. Antecedentes del empleo de cemento LC3 en morteros de albañilería**

En el trabajo de diploma de Álvarez (2014), se empleó en morteros de albañilería, el cemento SIG B-45 producido a escala industrial en la Fábrica de Cemento de Siguaney con un 45 % de sustitución de clínquer por metacaolín y caliza (2:1). Los valores de resistencia a compresión de los morteros tipo II y III según la NC 175:2002, mostraron un sobrecumplimiento en un 50% de las especificaciones establecidas en dicha norma.

Estudios realizados por Rodríguez (2014), se emplearon en morteros de albañilería, los cementos B-60 (LC3-60 (2:1)) y B-75 (LC3-75 (2:1)) con 60 y 75% de sustitución de clínquer por metacaolín y caliza, producidos estos a escala de laboratorio en un molino de bolas de acero MB-800 que desarrolla un mecanismo de impacto y desgaste, con el que se pueden lograr partículas con tamaño de 10 µm. La finura de molienda obtenida para los cementos B-

60 y B-75 semejaron las obtenidas en la Fábrica de Cemento de Siguaney, alcanzando valores de 92.8 y 91.4 % respectivamente pasado por el tamiz de 90  $\mu\text{m}$ . Además, al cumplir con lo establecido en la norma cubana NC 97:2011, la norma chilena 3121/1-2010, la norma europea EN 196 y la norma guatemalteca NTG 41096, se pudieron clasificar como cementos de albañilería. La resistencia a compresión de los morteros de albañilería tipo II y III según la NC 175:2002, con empleo de estos cementos superó los valores establecidos en dicha norma, aunque las absorciones de los cementos a evaluar fueron mayores que los valores obtenidos para los morteros patrón elaborados con PP-25.

Aunque no existen referencias del empleo de LC3 producido artesanalmente en la elaboración de morteros de albañilería, Aguilar (2015) utilizó el cemento LC3-50(1,5:1) utilizando como adición puzolánica: rasillas de barro calcinadas y gravilla, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa. Obteniendo una finura de molienda de 91.5% pasado por el tamiz de 90  $\mu\text{m}$  y la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón tipo III cumplió con las resistencias mínimas a los 7 y 28 días y con el porcentaje de absorción máximo especificado en la NC 247-2010.

El empleo de cementos con 50 y 60% de sustitución de P-35 muestra un excelente potencial y constituye una viable alternativa para nuestro país debido a que se puede llegar a establecer una producción comercial de cemento con menor costo, aplicable en albañilería y con una composición muy similar a la usada en aglomerantes de morteros históricos tradicionales.

## 1.5. Conclusiones parciales

1. El uso de puzolanas, como sustituto parcial del cemento en morteros, produce una mayor densificación con reducción de los índices de difusión de gases e iones y logra una mejora de la durabilidad. Fundamentalmente el uso de la cerámica molida, proporciona la mejoría de las propiedades hidráulicas, durabilidad y resistencia mecánica en los morteros.
2. Los principales requisitos que deben cumplir los morteros de restauración para su utilización en la conservación de edificios antiguos son: ser durables, no contribuir a la degradación de los materiales preexistentes, proteger las paredes de las acciones externas, ser reversibles y no perjudicar la presentación estética y visual de la arquitectura.
3. En los trabajos de restauración de las edificaciones antiguas los morteros más utilizados son los elaborados con mezclas de cal apagada y materiales puzolánicos. Pero el empleo de materiales cementicios suplementarios producidos a partir de minerales arcillosos constituye una atractiva opción como fuente para garantizar la durabilidad de los morteros de reparación en obras patrimoniales.
4. El empleo de materiales cementicios suplementarios producidos a partir de minerales arcillosos constituye una alternativa interesante para morteros de reparación en obras patrimoniales debido a sus particulares características químicas y mineralógicas.
5. El uso de nuevas formulaciones de cemento LC3 con bajo contenido de clínquer y su producción artesanal, constituye una opción muy interesante para el uso en morteros de restauración pues permitiría lograr un aglomerante similar a los utilizados históricamente para estas actividades y por otra parte aprovecharía las potencialidades locales.

## **CAPÍTULO II. EMPLEO DE LOS CEMENTOS LC3-50 Y LC3-60 EN MORTEROS DE ALBAÑILERÍA**

### **2.1. Generalidades**

En el siguiente capítulo quedan definidas las características de las materias primas empleadas para la fabricación de morteros de albañilería mediante ensayos realizados a cada una de forma independiente. Además, se establece el proceso de formulación de los morteros según la NC 175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones, con empleo de cementos ternarios elaborados artesanalmente con sustituciones del 50 y 60% del cemento Portland por una mezcla de polvo de cerámica roja y caliza en proporción 2:1, tendiendo como patrón de comparación el cemento PP-25. También, se describen y realizan los ensayos físico-mecánicos a los morteros elaborados con los cementos LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) para evaluar posteriormente sus propiedades en estado fresco y endurecido.

### **2.2. Diseño experimental**

La fase experimental se lleva a cabo para analizar y valorar el comportamiento que puede tener el LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) en los morteros de albañilería en comparación al PP-25 y siguiendo los criterios establecidos en la NC 175:2002.

#### **Metodología del diseño unifactorial:**

1. Obtención de los materiales constituyentes de los morteros a elaborar.
2. Realización de los ensayos de caracterización a las materias primas: árido, cementos y cal.
3. Fabricación de morteros de albañilería tipo III, fijando la fluidez y atendiendo a las dosificaciones y parámetros establecidos en la NC 175:2002.
4. Elaboración de probetas de (40x40x160) mm y ruedas de (15x4) cm para la realización de los siguientes ensayos:
  - ✓ Resistencia mecánica a flexo-compresión a los 3, 7 y 28 días, (3 ensayos por serie de mortero).
  - ✓ Absorción de agua por capilaridad a los 28 días, (6 ensayos por serie de mortero).
  - ✓ Densidad aparente en estado endurecido a los 28 días, (9 ensayos por serie de mortero).
  - ✓ Porosidad abierta en estado endurecido a los 28 días, (9 ensayos por serie de mortero).

- ✓ Permeabilidad al agua a los 28 días, (6 ensayos por serie de mortero).
- 5. Obtención de los valores para cada serie de morteros.
- 6. Evaluación de los resultados obtenidos.

**Declaración de variables:**

Las variables dependientes están en correspondencia con las propiedades a analizar de morteros de albañilería en estado fresco y endurecido:

- ✓ Resistencia mecánica a flexo-compresión a los 3, 7 y 28 días
- ✓ Absorción
- ✓ Densidad
- ✓ Porosidad
- ✓ Permeabilidad al agua.

Las variables independientes están en correspondencia con los factores que intervienen y de los niveles de variación de estos:

- ✓ Tipo de mortero: (III) con 1 nivel de variación
- ✓ Cementos: LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25 con 3 niveles de variación
- ✓ Árido: (arena de El Purio) con 1 nivel de variación
- ✓ Cal: con 1 nivel de variación.

Para el diseño de las mezclas se empleó el mortero tipo III con una proporción volumétrica de 1:4:1 (cemento–arena–cal) debido a que en la NC 175:2002 se plantea que puede emplearse en muros portantes y de cierre, para resano, repello grueso y fino, así como para colocación de azulejos y piezas de cerámicas.

**2.3. Obtención y caracterización de las materias primas**

Para la confección del mortero se determinó utilizar áridos naturales que tuvieran la menor cantidad de impurezas orgánicas, para ello se escogió el árido originado por la trituración de rocas de la cantera Mariano Pérez (El Purio) en la provincia de Villa Clara. (ver Fig. 2.1 a). Los cementos empleados fueron el LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) producidos en el laboratorio de materiales de la Facultad de construcciones de la UCLV y el PP-25 de la Fábrica de Cemento Siguaney en la provincia de Sancti Spíritus mostrados en la (Fig. 2.1 b y c).



Figura 2.1: Materias primas empleadas (a, b, c y d).

### 2.3.1. Árido

Los áridos fueron caracterizados en el laboratorio de la ENIA en Villa Clara. Primeramente se realizó el cuarteo del material donde se tomaron varias muestras de 45 kg para cada ensayo de caracterización, fue necesario en la preparación del árido para la mezcla tamizar por la malla # 4 siguiendo las especificaciones de la norma NC 175: 2002. En las tablas siguientes se muestran las características físico-mecánicas de la arena utilizada para la elaboración de las mezclas de morteros.

Tabla 2.1 (a): Características físico – mecánicas del árido de la cantera El Purio.

ENSAYOS			
Material más fino que el tamiz 200 (NC 182:2002)			
	Pesos (g)	% pasado por Tamiz - 200	Especificaciones (NC 657:2008)
Peso inicial seco	537.03	2.8	≤ 10
Peso final seco	521.99		
Partículas de arcilla			
	Pesos (g)	% de partículas de arcilla	Especificaciones
Peso inicial	190.52	0.21	1
Peso final	190.12	0.17	
Peso Específico (NC 186:2002)			
	Pesos (g/cm³)	Incertidumbre	Especificaciones (NC 657:2008)
PEC	2.51	0.019	≥ 2,5
PES	2.59	0.019	---
PEA	2.72	0.018	---

<b>% Absorción</b>	3	0.17	≤ 3,0
<b>Peso Volumétrico (NC 181:2002)</b>			
	<b>Pesos(Kg/ m³)</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>Especificaciones</b>
<b>Peso volumétrico suelto</b>	1509	41.52	---
<b>Peso volumétrico compactado</b>	1547	39.87	

*Fuente: Elaborado por el autor.*

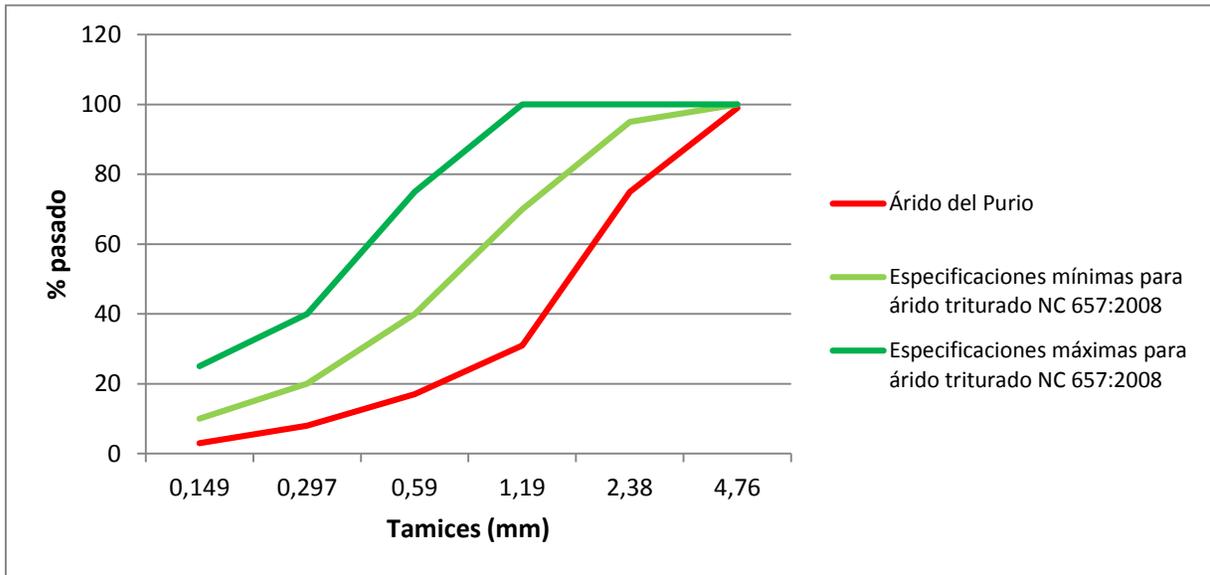
**Tabla 2.1 (b): Análisis granulométrico del árido de la cantera El Purio.**

Tamices		% pasado	Especificaciones (NC 657:2008)
No.	mm		
4	4,76	99	100
8	2,38	75	95 - 100
16	1,19	31	70 - 100
30	0,59	17	40 - 75
50	0,297	8	20 - 40
100	0,149	3	10 - 25
200	0,074	---	0 - 10
Módulo de finura (MF) = 3.66			

*Fuente: Elaborado por el autor.*

En la Fig. 2.2 se aprecia la curva granulométrica de la arena y se compara con las especificaciones granulométricas mínimas y máximas que deben cumplir las arenas trituradas para ser empleadas en morteros de albañilería según la norma cubana NC 657:2008. Mediante el análisis del gráfico se establece la no conformidad de la arena empleada para elaborar morteros de albañilería, como posible resultado de un muestreo

inadecuado, en los demás ensayos cumple con las especificaciones exigidas por las normas.



**Figura 2.2: Gráfico de curvas granulométricas. Comparación con las especificaciones de la NC 657:2008.**

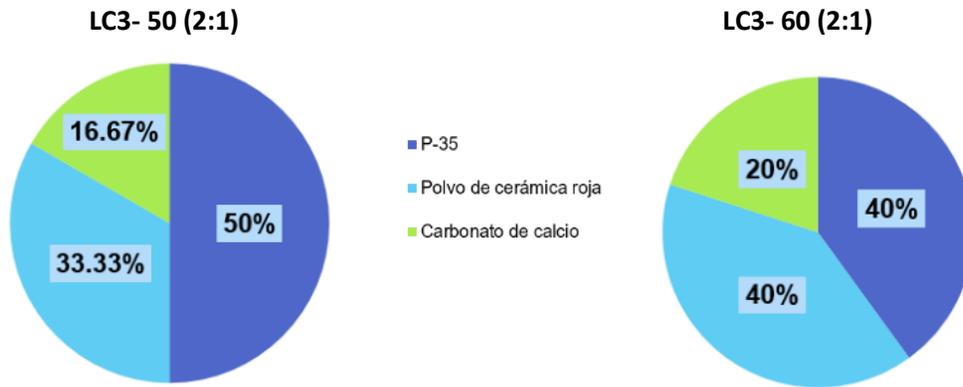
### 2.3.2. Cementos

Para la elaboración de las series de morteros se emplearon los cementos LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25. En el caso de los cementos LC3 se elaboraron en el laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones de la UCLV, en la tabla 2.2 se observan los porcentajes de cada materia prima empleados en la formulación de estos. El cemento PP-25 es procedente de la Fábrica de Cemento de Siguaney, producido a escala industrial y comercializado por la misma.

**Tabla 2.2: Formulaciones de los cementos de bajo contenido de carbono.**

Cementos	Proporciones de las materias primas (%)		
	P-35	Polvo de cerámica roja	Carbonato de calcio
LC3-50 (2:1)	50	33.33	16.67
LC3-60 (2:1)	40	40	20

*Fuente: Elaborado por el autor.*



**Figura 2.3: Gráfico de curvas granulométricas. Comparación con las especificaciones de la NC 657:2008.**

Los ensayos físico-mecánicos a los cementos se realizaron en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), en Villa Clara. Los resultados se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3: Propiedades físico – mecánicas de los cementos.**

Ensayos	UM	LC3-50 (2:1)	PP-25	Especif.
Tiempo de Fraguado Inicial	min	120	210	≥ 45min
Tiempo de Fraguado Final	h	2:55	4:45	≤ 10h
Consistencia Normal	%	24,4	26,9	---
Finura de Molido del cemento	%	90,4	7,0	e/ 90 y 95% pasado por el tamiz de 90µm
Superficie Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3323	3375	---
Peso Específico Real del Cemento	g/cm <sup>3</sup>	2,86	2,8	---
Resistencia a Compresión 3 días	MPa	9,8	2,5	---
Resistencia a Compresión 7 días	MPa	15,1	21,4	---
Resistencia a Compresión 28 días	MPa	21,5	30,3	---

*Fuente: Elaborado por el autor.*

### 2.3.3. Cal

El hidrato de cal fue adquirido en la Empresa de Materiales de la Construcción procedente de la cantera Palenque en Villa Clara, en sacos de 30 kg en estado seco. Los ensayos de

caracterización de la materia prima fueron realizados en el laboratorio central de materiales (LACEMAT) del Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4: Análisis químico de la cal.**

Ensayos	UM	Resultados			Normas
		1	2	Prom.	
Dióxido de Silicio ( SiO <sub>2</sub> )	%	2.12	2.08	2.10	NC 54-35/86
Óxido Férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	1.91	1.91	1.91	NC 54-339/86
Óxido de Aluminio ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	3.66	3.66	3.66	NC 54-338/86
Óxido de Calcio (CaO)	%	54.91	54.91	54.91	NC 54-341/86
Óxido de Magnesio (MgO)	%	2.12	2.12	2.12	NC 54-337/86
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	%	0.12	0.14	0.14	NC 54-05/85
Perdida por Ignición(PPI)	%	30.93	30.95	30.94	NC 054-004/85
Carbonato de Magnesio (MgCO <sub>3</sub> )	%	3.60	3.60	3.60	NC 54 – 27: 1985
Humedad	%	0.82	0.79	0.80	NC 44-20: 72
Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	%	98.05	98.05	98.05	NC 44-20/72
Óxido de Calcio (CaO) e Hidrato de Calcio. Determinación Volumétrica del por ciento Aprovechable.	%	41.44	41.44	41.44	NC 54 –279/1984

**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### 2.3.4. Agua

Se utilizó agua limpia, libre de álcalis y ácidos provenientes del servicio público que cumplía con los requisitos de la norma cubana NC 353:2004 *Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros – Especificaciones*.

#### 2.4. Fabricación de las mezclas de morteros

Las mezclas de morteros de albañilería fueron elaboradas en la ENIA, Villa Clara. Primeramente se pesó cada material, se dosificó gravimétricamente en una bandeja (a) según las proporciones establecidas en la tabla 2.5 posteriormente se colocó en la amasadora con el objetivo de facilitar el mezclado y garantizar la correcta homogenización de los materiales, después de mezclado y amasado (b) se determinó el peso volumétrico de

la mezcla (c) como se muestra en la Fig. 2.4. En la tabla 2.5 se presentan las series de morteros fabricadas.



Figura 2.4: Proceso de fabricación de los morteros (a, b, cd)

Tabla 2.5: Dosificaciones de mezclas de morteros según NC 175:2002

No. mezcla	Mortero tipo	Tipo de cemento	Proporciones			Cant. de probetas
			Cemento	Arena	Cal	
M1	III	LC3-50 (2:1)	1	4	1	24
M2	III	LC3-60 (2:1)	1	4	1	24
M3	III	Ref. PP-25	1	4	1	24

Fuente: Elaborado por el autor

#### 2.4.1. Ensayo de consistencia. NC 170:2002

La consistencia se determinó por la mesa de sacudidas según las especificaciones de la norma NC 170:2002, adicionando agua a la mezcla hasta que esta cumpla con establecido en dicha norma (190 mm  $\pm$  5 mm) de diámetro (ver Fig. 2.5).

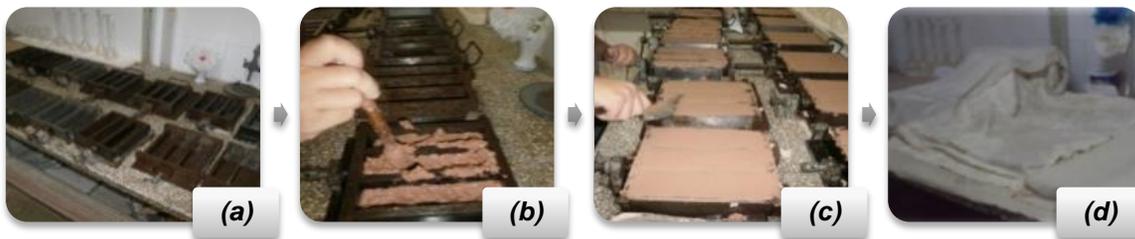


Figura 2.5: Determinación de la fluidez en la mesa de sacudidas

#### 2.4.2. Proceso de fabricación de las probetas. NC 173:2002

La fabricación de las probetas prismáticas se llevó a cabo tomando como referencia los requerimientos exigidos por la norma NC 173:2002, siendo esta la normativa que regula la fabricación de probetas para morteros de albañilería.

Primeramente se limpiaron, engrasaron y armaron los moldes de 40x40x160 mm. Se vertió el material en los moldes en dos capas sucesivas compactando cada una con 25 golpes suaves y homogéneos. 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 24 horas de elaboradas las probetas se desmoldaron, se marcaron y se sometieron al proceso de curado en un ambiente con humedad relativa de aproximadamente un 90 % (no sumergidas en agua). Por cada muestra se fabricaron 8 moldes de probetas prismáticas de (40x40x160 mm) para la realización de los ensayos programados en el diseño de experimento. Se elaboraron 72 probetas que corresponde al diseño de 3 mezclas en un total de 24 amasadas. Además, se elaboraron probetas cilíndricas para el ensayo de permeabilidad, estas fueron fabricadas en tres capas de 10 cm aproximadamente y compactadas a 25 golpes por capa. (ver Fig. 2.6 a, b, c, d y e).



**Figura 2.6: Producción de probetas prismáticas (a, b, c y d)**

### 2.5. Ensayos físico-mecánicos a probetas de morteros. Procedimientos

#### 2.5.1. Resistencia a flexión y compresión. NC 173:2002 y NC 506:2007

El ensayo de la resistencia a flexo-compresión se ejecutó siguiendo los pasos según la normativa NC 173:2002. El procedimiento para su cálculo se establece en la norma cubana de cemento NC 506:2007 *Cemento Hidráulico-Método de ensayo*. Se elaboraron 3 probetas prismáticas de (40 x 40 x 160mm) por cada muestra para ensayar a las edades de 3, 7 y 28 días, con un total de 27 probetas. Para el ensayo de flexión se colocaron las probetas en una prensa Caenao BCCCP (1975) que dispone de 3 cilindros de acero de 10 mm de diámetro, en dos de ellos donde descansa la briqueta y el tercero que está equidistante de estos dos

se apoyó sobre la cara opuesta de la probeta ejerciendo una carga P verticalmente y creciendo progresivamente (ver Fig. 2.7 a).

El ensayo de compresión se realizó utilizando las mitades que resultaron del ensayo a flexión, en este se ejerció un esfuerzo a través de dos placas de acero sobre la sección de (40x40 mm) de la probeta hasta que llegó a la deformación de esta, se tomó en ese momento la carga de rotura (ver Fig. 2.7 b). Luego de la rotura se calcularon los valores de resistencia por los parámetros de la norma según las ecuaciones 2.1 y 2.2 y se tomaron los resultados medios de los valores alcanzados.

$$R_f = 0,0234 Q \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.1}$$

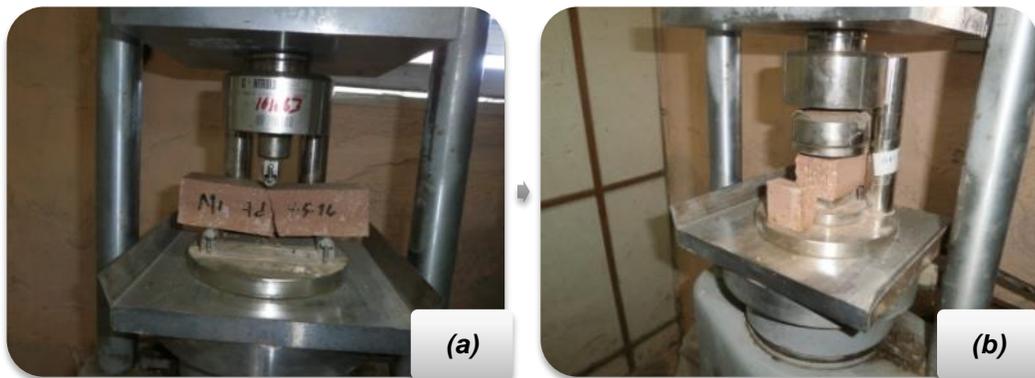
$$R_c = Q/1600 \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

Q, es la carga de rotura en cada ensayo (N).

R<sub>f</sub>, es la resistencia a flexión (MPa).

R<sub>c</sub>, es la resistencia a compresión (MPa)



**Figura 2.7: Ensayos de resistencia a la flexión y compresión (a, b).**

### 2.5.2. Absorción de agua por capilaridad. NC 171:2002

Para este ensayo se colocaron en absorción 18 probetas prismáticas, 6 por cada serie de mortero a la edad de 28 días. Las probetas luego de sacadas del curado se ubicaron en la estufa por 24 horas, posteriormente se dejaron enfriar, se pesaron y se situaron en posición vertical sobre un lecho de arena de aproximadamente 10 mm de espesor en una bandeja que contenía 5mm de agua por encima del lecho de arena. Para mantener la altura del agua se utilizó un recipiente con agua y se colocó en posición invertida dentro de la bandeja a 5 mm. A las edades de 4 h; 8 h; 1; 3; 5 y 7 días a partir que comienza el ensayo se retiraron del recipiente y se pesaron anotando así los aumentos de peso que experimentaron las

probetas. Los parámetros para el cálculo de la absorción se determinaron según la norma antes mencionada, mediante la ecuación 2.3.

$$\text{Absorción capilar} = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{16} \text{ (g/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.3}$$

### 2.5.3. Ensayo de porosidad abierta. Procedimiento Dr. Andrade

La porosidad abierta se realizó siguiendo el procedimiento de ensayo de la hervidura de la probeta descrito por el Dr. Andrade. Se ensayaron 3 probetas prismáticas por cada dosificación a la edad de 28 días. Luego del curado se situaron las probetas en la estufa durante 24 horas a una temperatura de 105°C, seguidamente se fue tomando el peso de las probetas en distintos intervalos de tiempo hasta que su peso se mantuvo constante. Después que las probetas se encontraron completamente libres de humedad se colocaron a hervir durante 4 horas y posteriormente se dejaron a temperatura ambiente 24 horas más. Al otro día se pesaron las muestras en balanzas técnicas y en balanzas hidrostáticas, obteniéndose sus pesos saturados y sumergidos. Se procedió a determinar el porcentaje de porosidad abierta según la ecuación 2.4.

$$\Delta P = \frac{M_T - M_0}{V} * 100 \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

$M_T$ , es el peso de la probeta en función del tiempo de inmersión (g).

$M_0$ , es el peso inicial de la probeta (g).

$V$ , es el volumen de la probeta (cm<sup>3</sup>).

### 2.5.4. Densidad aparente en estado endurecido. NC EN 1015-10:2008

Para la realización del ensayo, primeramente, se lleva a cabo el secado de la probeta en estufa, a una temperatura de 70 ± 5°C, hasta que estas alcancen masa constante, es decir cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas a intervalos de 2 horas de secado, no difieran en más de 0,2 % de la masa de la probeta seca. Se anota la masa de la probeta  $m_{s, sec}$  en kg con una exactitud aproximada del 0,1 %. Luego la probeta se sumerge en agua a 20 ± 2°C hasta que no se observe aumento de la masa aparente. Se considera que esta fase se alcanza cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas en un intervalo de 15 min durante la inmersión, no difieren en más de 0,2 % en masa. La probeta húmeda se pesa después de haber eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa  $m_{s, sat}$  en kg con una exactitud aproximada del 0,1 %.

El volumen de la probeta se puede determinar por pesada hidrostática. Se deja que el instrumento de pesado alcance el equilibrio, asegurándose que el estribo vacío esté

suspendido y que esté completamente sumergido en el agua del recipiente. El estribo se sumerge hasta la misma profundidad en las que se efectúan las pesadas con o sin la probeta. La probeta húmeda se coloca en el estribo. Se eliminan las burbujas de aire atrapadas en las caras de la probeta. La probeta en esta posición (sumergida) cuando ha cesado la oscilación de la balanza hidrostática se pesa y se anota la masa de la probeta,  $m_{s,i}$  en kg en esta posición sumergida.

Entonces con estos datos se determina el volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico, de acuerdo a la ecuación 2.5.

$$V_S = (m_{s,sat} - m_{s,i}) / \rho_w \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.5}$$

Luego:

$$\text{Densidad aparente en estado endurecido} = m_{s,sec} / V_S \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.6}$$

### 2.5.5. Ensayo de permeabilidad al agua. JIS-1404:1977

El procedimiento para determinar el ensayo de permeabilidad al agua que se describe a continuación es un método descrito en la norma japonesa JIS-1404:1977, realizado por laboratoristas del CIDC en la provincia La Habana.

Después de preparada la mezcla se llenaron los moldes cilíndricos de 15 x 30 cm cada 3 capas compactadas a 25 golpes cada una. Se elaboraron 6 moldes, 2 por cada dosificación; con ellos se cortaron ruedas cilíndricas de 15 x 4 cm de espesor para utilizarlos en este ensayo a los 28 días de edad, siendo un total de 18 ruedas. A la edad de 28 días se ensayaron las muestras cilíndricas utilizando un permeabilímetro mostrado en la Fig. 2.8 que se carga hasta la unidad de presión 1 bar, luego se abren las llaves de paso para que el agua actúe a presión durante una hora por ambos extremos de las muestras. Posteriormente se anotó las lecturas del flujo a la que fue capaz de resistir los especímenes analizados con ambos cementos, comprobando así la permeabilidad presente en dicho material.



Figura 2.8: Ensayo de permeabilidad al agua.

## **2.6. Conclusiones parciales del capítulo.**

1. Para la elaboración de morteros de albañilería y para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación, se concibió un diseño de experimento utilizando 3 tipos de cementos (LC3 50(2:1), LC3 60(2:1) y PP 25), lo cual permitió comparar y evaluar la influencia de dichos aglomerantes en los morteros.
2. Los ensayos físico-mecánicos como la resistencia a compresión, la absorción de agua por capilaridad, porosidad abierta, densidad aparente y permeabilidad al agua, permitirán realizar la evaluación de las propiedades más importantes de los morteros de albañilería diseñados con los nuevos aglomerantes, permitiendo tomar decisiones acertadas acerca de su uso futuro.
3. El árido empleado para la elaboración de las probetas de mortero no satisface las especificaciones en cuanto a la granulometría según lo que establece la NC 54 256:83 lo que puede afectar propiedades como la laborabilidad y la resistencia en las mezclas.

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A MORTEROS DE ALBAÑILERÍA ELABORADOS CON LC3.

En este capítulo se muestran y analizan los resultados de los ensayos físico-mecánicos realizados a los morteros con el uso de cementos de bajo contenido de carbono LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) según el diseño experimental, así como su comparación con el cemento Pórtland Puzolánico PP-25 y con las normativas nacionales e internacionales vigentes. Para ello se empleó el programa Statgraphics Centurion, representando los resultados estadísticos tanto gráfica como analíticamente, dicho programa permitió determinar si estos cementos tienen efecto significativo sobre la resistencia a compresión, absorción de agua por capilaridad, porosidad abierta, permeabilidad al agua y densidad aparente en estado endurecido.

### 3.1. Análisis de resultados de la consistencia de los morteros

La consistencia se determinó por la mesa de sacudidas según las especificaciones de la norma NC 170:2002, adicionando agua a la mezcla hasta que esta cumpla con establecido en dicha norma (190 mm  $\pm$  5 mm) de diámetro. En la tabla 3.1 se presentan los valores obtenidos en la mesa de sacudidas.

**Tabla 3.1: Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas**

Muestra	Tipo de cemento	Agua (ml)	Consistencia (cm)
M-1	LC3 50(2:1)	295	19.5
M-2	LC3 60(2:1)	300	19
M-3	PP 25	280	19

*Fuente: Elaborado por el autor*

En la tabla 3.1 se observa que el mortero M-2 necesita más agua para lograr la consistencia adecuada y eso tiene relación directa con el tipo de cemento utilizado. En el caso del M-2 se usa un cemento LC3 60(2:1), que como se explicó en el epígrafe 2.3.2, tiene un mayor % de sustitución del contenido de cemento por la adición de polvo de cerámica roja y caliza en proporción 2:1. Es por ello que al tener mayor contenido de finos es menor la laborabilidad de la mezcla y propicia un aumento de la demanda de agua para unir los granos más finos.

### 3.2. Análisis de resultados de la resistencia mecánica de los morteros

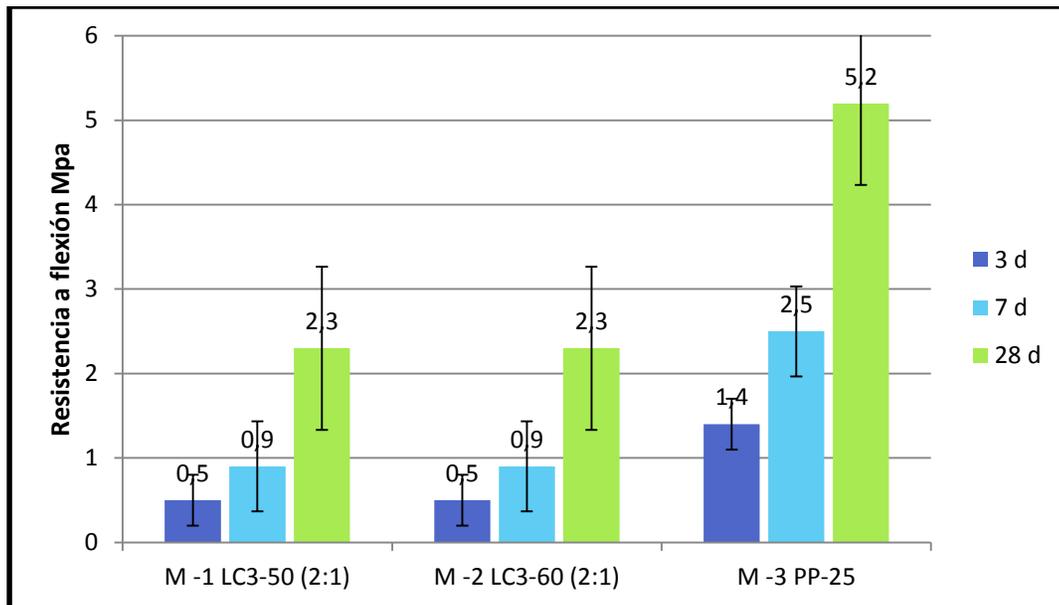
La resistencia a flexión y compresión de los morteros de albañilería se determinó a las edades de 3, 7 y 28 días, utilizándose para la realización del ensayo en cada edad 3 probetas de (40x40x160 mm). Se presentan en la tabla 3.2 los resultados de las resistencias medias a flexión y compresión obtenidos para cada tipo de cemento ensayado.

**Tabla 3.2: Resultados del ensayo de resistencia a flexión y compresión.**

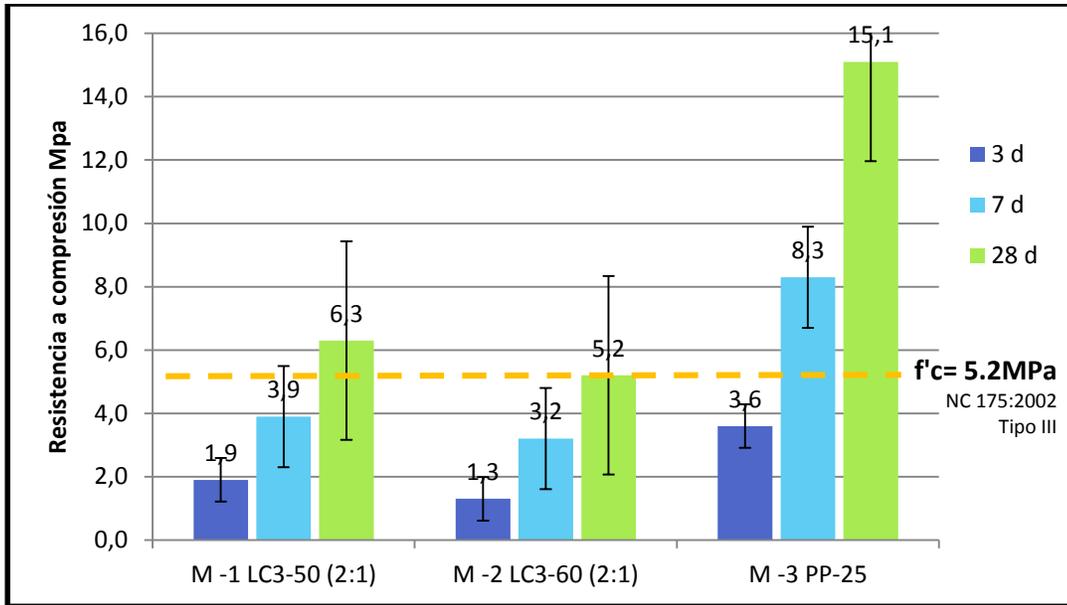
Serie de mortero	Tipo de mortero	Tipo de Cemento	Resistencia (MPa)					
			Flexión			Compresión		
			3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
M1	III (1:4:1)	LC3-50 (2:1)	0.5	0.9	2.3	1.9	3.9	6.3
M2		LC3-60 (2:1)	0.5	0.9	2.3	1.3	3.2	5.2
M3		PP-25	1.4	2.5	5.2	3.6	8.3	15.1

*Fuente: Elaborado por el autor.*

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran el comportamiento de la resistencia a flexión y compresión respectivamente para cada edad de ensayo, en ambos gráficos se aprecia el aumento de estas en el tiempo para cada serie de mortero, por lo que su comportamiento es normal, debido que no hay irregularidades entre dichos valores.



**Figura 3.1: Gráfico de resistencia a flexión.**



**Figura 3.2: Gráfico de resistencia a compresión.**

Mediante el análisis de los datos obtenidos en el gráfico, se obtiene que los morteros elaborados con los cementos LC3-50(2:1) y LC3-60(2:1), aunque presentan resistencias inferiores respecto a la muestra patrón (PP25), cumplen con las especificaciones establecidas por la norma cubana 175:2002 que para los morteros (Tipo III) establece 5,2 MPa a los 28 días.

Cuando se comparan los valores de resistencia a compresión a los 28 días con la muestra patrón M3, se obtiene que la resistencia de las series M1 y M2 representan el 41,7 y 34,4% respectivamente, de la resistencia de la serie M3.

En la tabla 3.2 se puede observar que la muestra M1, con un 50% de sustitución de clínquer, dosificados según la NC 175:2002 para cemento PP25, sobrecumple en un 21,2% la resistencia establecida según dicha norma a los 28 días. En el caso de la M2, con un 60% de sustitución de clínquer, cumple exactamente con el valor establecido.

Al comparar los resultados obtenidos con la dosificación establecida para el mortero tipo II con cemento de albañilería, se aprecia que las series M1 y M2 sobrecumplen en un 80 y 48,6% respectivamente.

**Tabla 3.2 (a): Comparación de los resultados de  $f'c$  a los 28 días con la NC 175:2002 (según el tipo de cemento).**

Muestra	Dosif. (c:a:cal)	Tipo de cementos	$f'c$ (MPa) 28 días	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento PP25)	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento de albañilería)
M1	1:4:1	LC3-50 (2:1)	6.3	5.2 (tipo III)	3.5 (tipo II)
M2	1:4:1	LC3-60 (2:1)	5.2		

*Fuente: Elaborado por el autor*

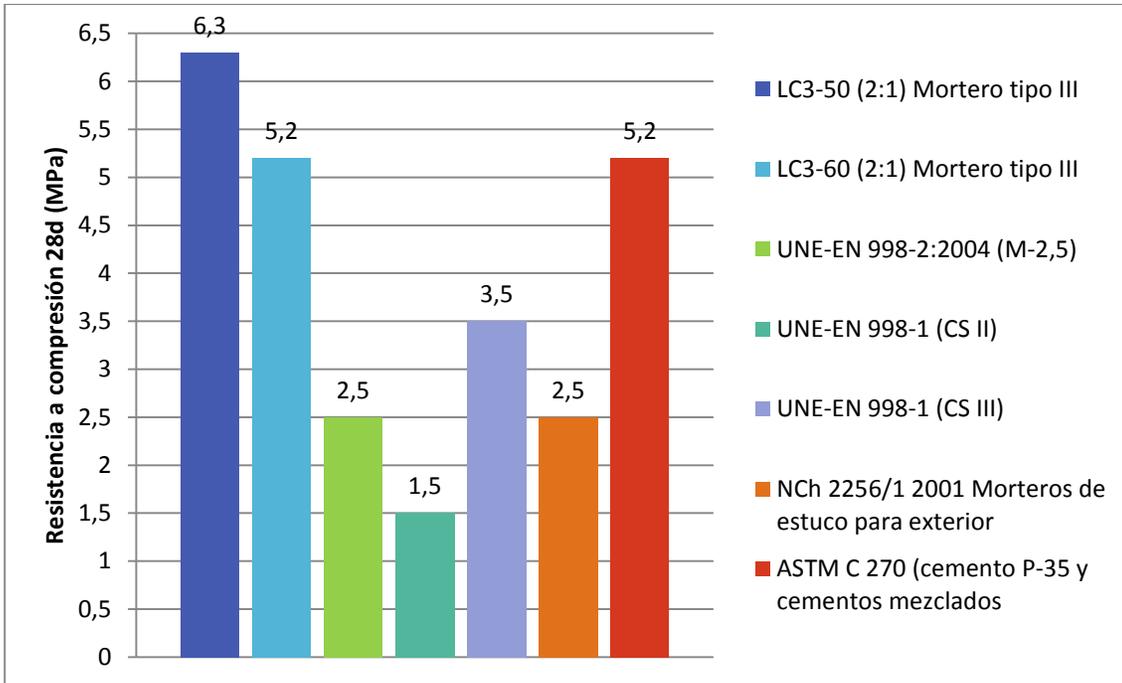
En la tabla 3.3 se puede observar que cuando se comparan los morteros M1 y M2 con algunas normativas internacionales (UNE-EN 998-2:2004/ mortero de albañilería; UNE-EN 998-1/ morteros de revoco y enlucidos; NCh 2256/1 del 2001 y ASTM C270) los mismos cumplen con los valores establecidos por dichas normas.

**Tabla 3.3: Comparación de los resultados de  $f'c$  a los 28 días con las normas internacionales**

Muestra	Tipo de cementos	$f'c$ (MPa) 28 días	$f'c$ (MPa) 28 días UNE-EN 998-2:2004 (mortero de albañilería)	$f'c$ (MPa) 28 días UNE-EN 998-1 (morteros de revoco y enlucidos)	$f'c$ (MPa) 28 días NCh 2256/1. 2001		ASTM C270 (cemento P-35 y cementos mezclados)
					Exter.	Inter.	$f'c$ (MPa) 28 días
M1	LC3-50 (2:1)	6.3	2.5 (M-2.5)	1.5 a 5.0 (CS II) 3.5 a 7.5 (CS III)	2.5	1.0	5.2 (tipo N)
M2	LC3-60 (2:1)	5.2					

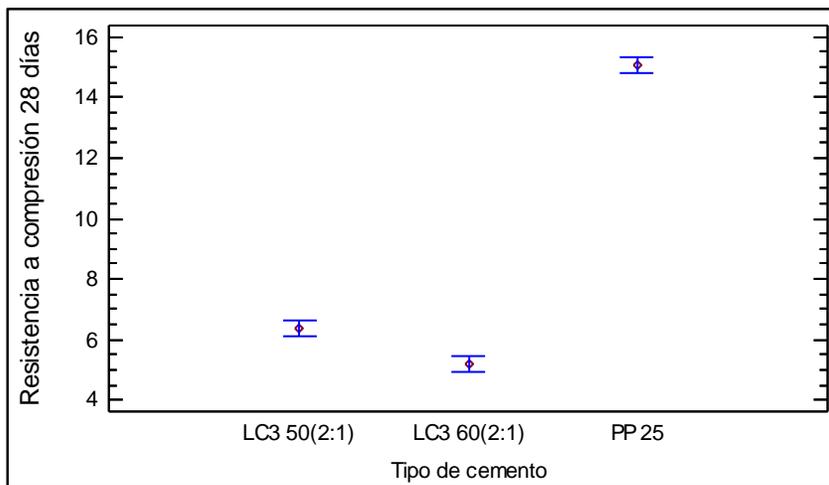
*Fuente: Elaborado por el autor.*

En la figura 3.3 se observa que en el caso del mortero M1, sobre cumple en 152%, 320%, 80%, 152% y 21,2% respectivamente las normas internacionales allí presentadas. Para el mortero M2 este sobre cumple en 108%, 246,7%, 48,6%, 108% respectivamente.



**Figura 3.3: Gráfico de comparación de los resultados de  $f'c$  a los 28 días con las normas internacionales.**

A continuación, se muestra en la Figura 3.4 el gráfico de resistencia media a compresión a 28 días de edad por tipo de cemento, obtenidos del procesamiento estadístico realizado en el software Statgraphics.



**Figura 3.4: Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD ( $f'c$  -vs- tipo de cemento).**

El método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher se emplea para discriminar entre las medias con confiabilidad del 95%. Mediante la prueba de múltiples rangos para

resistencia a compresión de los morteros por tipo de cemento y con ayuda de los gráficos anteriores se plantea que entre las medias de los tipos de cementos empleados para la producción de morteros de albañilería (LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25), existen diferencias significativas, entre los tres pares que se forman. Además, mediante el análisis de varianza se tiene que al obtener los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores que 0.05, el tipo de cemento tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión a 28 días, con un 95% de confianza (Ver Anexo 1).

Por otra parte, cuando se analiza la variación de resistencia a la compresión de los morteros para las edades 3,7 y 28 días, teniendo en cuenta el tipo de cemento, se observa que el aumento de la sustitución de cemento por contenido de material puzolánico condujo a una reducción en la resistencia del mortero.

Sin embargo, esta reducción no fue proporcional al incremento en el contenido de material puzolánico. Una vez que el mortero M2 con cemento con un nivel de sustitución igual al 60% de residuo cerámico, tuvo su resistencia reducida en aproximadamente un 17.5% en comparación con el mortero M1 que tiene un 50% de sustitución.

Una de las razones que pueden explicar una reducción de la resistencia a la compresión simple con el aumento del contenido de sustitución de cemento por el material puzolánico es el aumento de la relación agua / cemento causada por esta sustitución.

### 3.3. Análisis de los resultados de la absorción de agua por capilaridad en los morteros

El ensayo de absorción de agua por capilaridad fue realizado después de los 28 días de curado, para el mismo se colocaron 6 probetas prismáticas de 40x40x160cm por cada serie de mortero lo que da un total de 18 probetas prismáticas las cuales se pesaron consecutivamente en las edades exigidas por las normativas vigentes (4h, 8h, 1d, 3d, 5d y 7d) obteniendo los resultados siguientes:

**Tabla 3.4: Resultados del ensayo de absorción capilar.**

Serie de mortero	Tipo de cemento	Absorción (g/cm <sup>2</sup> )					
		4h	8h	1d	3d	5d	7d
<b>M1</b>	LC3 50(2:1)	1,05	1,38	1,97	2,19	2,21	2,21
<b>M2</b>	LC3 60(2:1)	1,17	1,51	2,16	2,49	2,56	2,56
<b>M3</b>	PP 25	0,4	0,55	0,91	1,2	1,29	1,39

**Fuente:** Elaborado por el autor.

Los resultados obtenidos en este ensayo muestran que al variar el tipo de cemento en la fabricación de los morteros de albañilería existen diferencias entre las series de morteros ensayadas, presentando valores de absorción mayores que el PP-25, comportándose el LC3 60(2:1) de forma superior a los demás, debido que tiene un mayor contenido de arcilla en su composición, mostrándose estas diferencias en la figura 3.5(a y b).

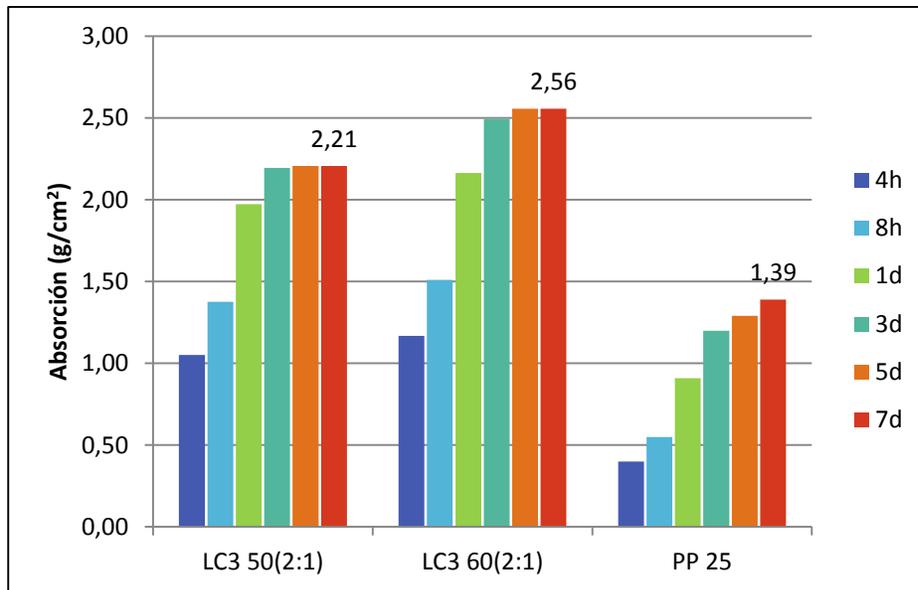


Figura 3.5a: Gráfico de absorción de agua por capilaridad.

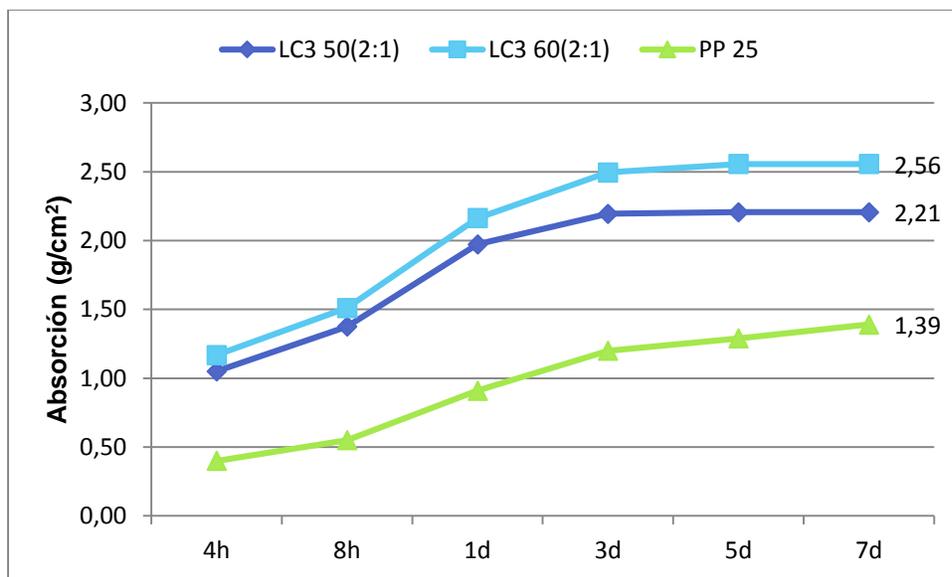


Figura 3.5b: Gráfico de absorción de agua por capilaridad.

Mediante el análisis estadístico presentado en el Anexo 2 se obtuvo al obtener los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores que 0.05, que al variar el tipo de cemento existe un efecto significativo sobre la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de ensayo, con un 95 % de confianza. Mediante la prueba de Múltiples Rangos que evalúa cuales medias son significativamente diferentes, se plantea que entre las medias de los tipos de cementos empleados para la producción de morteros de albañilería (LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25), existen diferencias significativas solamente entre los cementos LC3-50 (2:1) - PP-25 y LC3-60 (2:1) - PP-25, pero no entre los cementos LC3.

### 3.3. Análisis de resultados de la densidad aparente en estado endurecido de los morteros

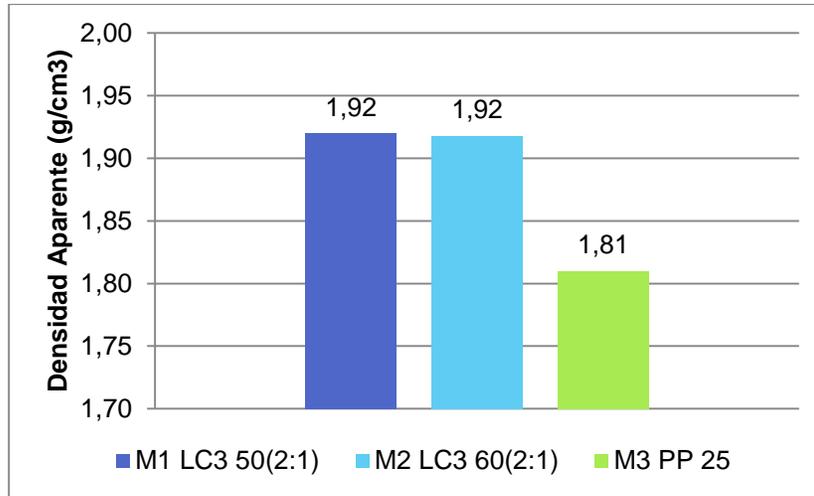
El ensayo de densidad aparente en estado endurecido se realizó a 28 días de edad, mediante el cual se ensayan 18 probetas, 9 por cada serie de mortero, los resultados del ensayo se identifican en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5: Resultados del ensayo densidad aparente.**

Serie de mortero	Tipos de Cementos	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
M1	LC3-50 (2:1)	1.92
M2	LC3-60 (2:1)	1.92
M3	PP-25	1.81

**Fuente:** Elaborado por el autor.

En la Fig. 3.6 se muestran los valores de densidad aparente de las series ensayadas. El comportamiento de la densidad aparente no se correlaciona con el comportamiento de la resistencia a compresión a los 28 días de edad, ya que los morteros con menores valores de densidad adquirieron mayores valores de resistencia a compresión a los 28 días de edad.



**Figura 3.6: Gráfico de densidad aparente en estado endurecido a los 28 días.**

La diferencia entre la densidad aparente y real está asociada directamente a la porosidad abierta, probetas con mayor densidad real y menor densidad aparente deben presentar mayor volumen de porosidad y mayor intercomunicación entre poros. De los resultados obtenidos de las densidades, se comprueba que todos los morteros elaborados en esta investigación se comportan de este modo.

En el anexo 3 se ubican los resultados del análisis estadístico. Mediante la prueba de múltiples rangos para densidad aparente en estado endurecido de los morteros por tipo de cemento se plantea que entre las medias de los tipos de cementos (LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25) empleados para la producción de morteros de albañilería no existen diferencias significativas entre los cementos LC3, solo existen diferencias cuando se comparan con la muestra patrón PP-25.

### 3.4. Análisis de resultados de la porosidad abierta de los morteros

Después del curado a los 28 días se ensayaron 18 probetas, 9 por cada serie de mortero, para determinar el porcentaje de poros presentes en cada una, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6: Resultados del ensayo de porosidad total.**

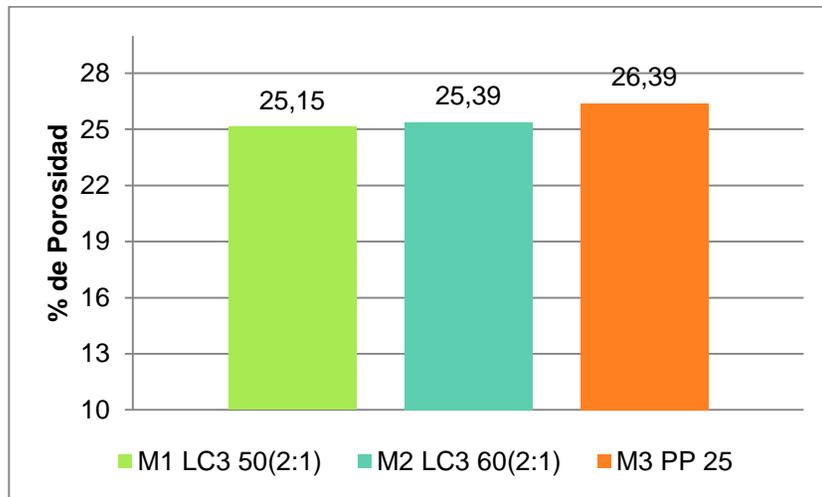
Serie de mortero	Tipos de Cementos	% de Porosidad
M1	LC3-50 (2:1)	25.15
M2	LC3-60 (2:1)	25.39
M3	PP-25	26.39

*Fuente: Elaborado por el autor.*

A partir de los valores medios obtenidos se representó gráficamente en la Fig. 3.7 los porcentos de porosidad. En este se observa que los morteros de albañilería presentan valores similares de % de porosidad, en el orden del 25%.

Se percibe que los morteros elaborados con cemento LC3 (M1 y M2) presentan un menor porcentaje de poros con respecto a la serie M3 (PP-25).

Estos resultados podrían considerarse contradictorios si los relacionamos con la resistencia a compresión de los mismos, pues supuestamente los morteros con menor porosidad deben tener mayor resistencia, y como se puede observar la serie M3 presenta mayor porosidad, pero paradójicamente mayor densidad aparente y mayor resistencia a compresión.



**Figura 3.7: Gráfico de porosidad total a los 28 días.**

Para poder analizar los valores de porosidad alcanzados por los morteros, se hizo referencia a la investigación de Sánchez A. et. al, (2002), este autor establece una relación de la calidad del mortero dada su porosidad. En dicha investigación se plantea que los morteros de porosidad abierta con valor inferior a 20% son de buena calidad y compactos, los de porosidad abierta con valor entre 20% y 30% son buenos pero porosos y los de mayor de 30% de porosidad abierta presentan baja calidad al ser muy porosos.

Como se puede observar en la tabla 3.6 y la figura 3.7, los valores de porosidad se consideran buenos y se encuentran en los rangos de 25% a 27 %.

En el anexo 4 se ubican los resultados del análisis estadístico. Mediante la prueba de múltiples rangos para densidad aparente en estado endurecido de los morteros por tipo de cemento se plantea que entre las medias de los tipos de cementos (LC3-50 (2:1), LC3-60 (2:1) y PP-25) empleados para la producción de morteros de albañilería no existen diferencias significativas entre los cementos LC3, solo existen diferencias cuando se comparan con la muestra patrón PP-25.

### 3.5. Análisis de resultados de permeabilidad al agua de los morteros

Después del curado a los 28 días se ensayaron 12 probetas, 6 por cada serie de mortero, para determinar la permeabilidad al agua en cada una, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.7.

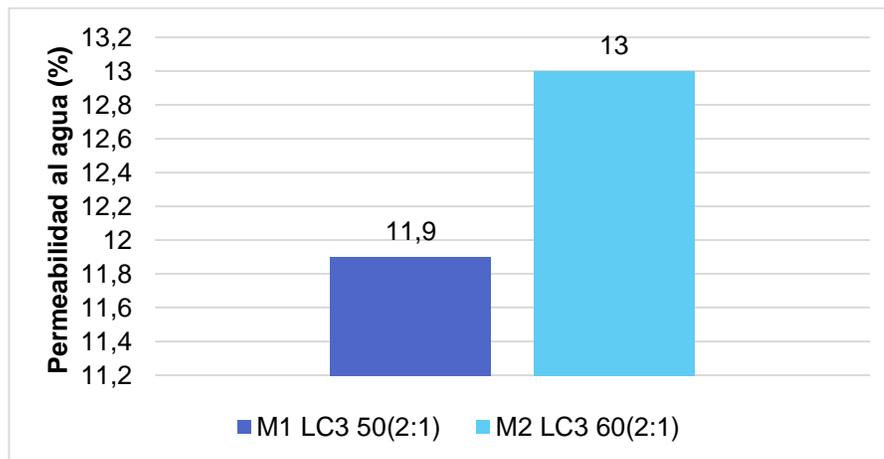
Como se puede observar en el gráfico 3.8, los valores de permeabilidad de los morteros M-1 y M-2 tienen un comportamiento bastante similar.

Cuando se correlacionan los valores de permeabilidad con los de porosidad abierta se puede observar que el comportamiento se corresponde con lo esperado, donde los morteros de mayor porosidad son más permeables. En este caso el mortero M-2 es ligeramente más poroso y además es el más permeable.

**Tabla 3.7: Resultados del ensayo de permeabilidad al agua.**

Serie de mortero	Tipos de Cementos	Valor medio (%)
M1	LC3-50 (2:1)	11.9
M2	LC3-60 (2:1)	13.0

*Fuente: Elaborado por el autor.*



**Figura 3.8: Gráfico de Permeabilidad al agua a los 28 días.**

Mediante el análisis estadístico presentado en el Anexo 5 se logra, al obtener los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores que 0.05, que al variar el tipo de cemento LC3, no existe un efecto significativo sobre la permeabilidad al agua con un 95 % de confianza.

### 3.6. Influencia del % de sustitución parcial de cemento en algunas propiedades de los morteros.

Como se puede observar en la tabla 3.8, se presentan los resultados obtenidos para la porosidad total, la densidad aparente, la permeabilidad al vapor de agua y la absorción capilar de los morteros M1 y M2 que contienen aglomerantes con 50% y 60% de sustitución de cemento con los residuos de cerámica y caliza en proporción 2:1.

**Tabla 3.8: Resultados del ensayo de permeabilidad al agua.**

<b>Serie de mortero</b>	<b>Tipos de Cementos</b>	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de Porosidad</b>	<b>Permeabilidad al agua Valor medio (g)</b>	<b>Absorción capilar 7d</b>
<b>M1</b>	LC3-50 (2:1)	1.92	25.15	67.9	2,21
<b>M2</b>	LC3-60 (2:1)	1.92	25.39	73.8	2,56
<b>M3</b>	PP-25	1.81	26.39		1,39

*Fuente: Elaborado por el autor.*

Según los datos de dicha tabla, se puede observar que no hubo variación significativa en las cifras de la densidad del mortero con el contenido de reemplazo.

Con respecto al contenido de sustitución, de acuerdo con la tendencia observada, se puede concluir que la porosidad total de los morteros que contienen el cemento con mayor contenido de residuo cerámico, siguen siendo más bajo que la muestra patron sin sustituciones. Los resultados también indican que entre los morteros M1 y M2 el que presenta mayor % de poros es el que presenta mayor absorción y mayor permeabilidad al vapor de agua.

### **3.7. Conclusiones parciales del capítulo**

1. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con cementos LC3 50(2:1) y LC3 60(2:1), cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC175:2002 y en las normativas internacionales analizadas, aunque sus resultados fueron inferiores al cemento de referencia PP25.
2. La absorción capilar en los morteros elaborados con cementos LC3 50(2:1) y LC3 60(2:1) adquiere valores superiores a los morteros elaborados con cemento PP25, pero de forma contradictoria el ensayo de porosidad presenta una disminución del porcentaje de poros.
3. La demanda de agua para lograr la consistencia requerida en las mezclas de morteros, usando los cementos LC3 50(2:1) y LC3 60(2:1), es mayor en comparación con el mortero con cemento PP25, debido a que estos cementos poseen mayor superficie específica originada por los grandes porcentajes de arcilla presentes en su composición.
4. Para los morteros ensayados se obtuvieron valores similares de densidad aparente, los que oscilan entre 1.81 y 1.92 g/cm<sup>3</sup>.
5. Los valores de porosidad abierta de los morteros M1 y M2 se encuentran en los rangos de 25% a 27 % por lo que se consideran buenos, de acuerdo al criterio de (Sánchez A. et. al, 2002), que establece una relación de la calidad del mortero dada su porosidad.
6. Los resultados indican que el mortero M2, que es el que contiene cemento con mayor % de sustitución de residuo cerámico y polvo de caliza, es el que presenta mayor % de poros, mayor absorción y en consecuencia mayor permeabilidad al vapor de agua.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. El uso de morteros con puzolanas como sustitución parcial del cemento ha sido estudiado a nivel internacional, demostrando que el uso de la cerámica molida proporciona la mejora de las propiedades hidráulicas, la durabilidad y resistencia mecánica en los morteros.
2. El empleo de materiales cementicios suplementarios producidos a partir de minerales arcillosos constituye una atractiva opción para los trabajos de restauración de las edificaciones antiguas.
3. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con cementos LC3 50(2:1) y LC3 60(2:1), cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC175:2002 y en las normativas internacionales analizadas, siendo el LC3 50(2:1) un 20% superior, sin embargo sus resultados fueron inferiores al cemento de referencia PP25.
4. Los valores de porosidad abierta de los morteros M1 y M2 se encuentran en los rangos de 25% a 27 % por lo que se consideran buenos, de acuerdo al criterio de (Sánchez A. et. al, 2002), que establece una relación de la calidad del mortero dada su porosidad.
5. Cuando se analizan los morteros elaborados con LC3, la muestra de mortero M2 que es el que contiene cemento con mayor % de sustitución de residuo cerámico y polvo de caliza, presentó una mayor demanda de agua para lograr la consistencia requerida y en consecuencia mostró mayor % de poros, mayor absorción y mayor permeabilidad al agua.
6. Los morteros fabricados con cementos que presentan grandes sustituciones de polvo de cerámica y caliza, constituyen una alternativa válida para usarse como morteros de albañilería pues los resultados de los ensayos físico-mecánicos demuestran que cumplen con las normativas nacionales e internacionales para este tipo de mortero.

## **RECOMENDACIONES**

1. Realizar otros ensayos como porosimetría por intrusión de mercurio que permita la evaluación de la estructura de poros presente en los morteros de albañilería elaborados con cemento de bajo carbono.
2. Crear nuevas normas en morteros de albañilería que establezcan parámetros de comparación para los ensayos de absorción, porosidad, densidad y permeabilidad al agua.
3. Continuar la investigación mediante la realización de ensayos acelerados de durabilidad a nivel de laboratorio (ciclos de humedad-secado, cristalización por inmersión total en sulfato sodio y lixiviación de sales), que permitan predecir el comportamiento químico de los cementos LC3-50 (2:1) y LC3-60 (2:1) en morteros de albañilería, bajo condiciones similares a las que están sometidas las estructuras patrimoniales en el país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO SÁNCHEZ, C. D. 2013. "Evaluación de la factibilidad de obtención de argamasa a partir del aprovechamiento de ladrillo y mortero contenido en escombros". Tesis de Diploma, Universidad del Valle.
- AFAM. n.d. "Morteros de albañilería" [Online]. Construmática. Available: <http://www.construmatica.com/construpedia/Morteros> de albañilería [Accessed 4 de marzo 2016].
- AGUADO CRESPO, F. 1990. *Introducción a la construcción*.
- AGUILAR, J. G., ROYO, I. M. & SOMOVILLA, I. A. 2014. Morteros de Restauración. *EL Obrador. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Huesca*.
- AGUILAR, 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". Tesis de Diploma, UCLV.
- ALONSO, D. D. C. 2014. "Evaluación del comportamiento físico mecánico de morteros tradicionales en la rehabilitación de edificaciones del Centro Histórico de Remedios". Tesis de Maestría, UCLV.
- ALUJAS, A. 2010. "Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente". Tesis Doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ALVAREZ IBARRA, C. 2014. "Evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería con CBC". Tesis de Diploma, UCLV.
- ÁLVAREZ, J. L. 2011. *MORTEROS DE ALBANILERIA, Antecedentes, clasificación, materiales, métodos de ensayos y tablas de resultados.*, La Habana, Cuba.
- ANTONI, M. 2012. "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone". *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 12, pp. 1579-1589.
- ANTONI, M. 2013. "Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone". Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias.
- ARRIOLA, J. M. 2009. "Diseño de morteros con cementos hidráulicos para la construcción de muros con elementos de mampostería". Tesis de Diploma, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- BARRERA, H., LUNA, P. & FAÚNDEZ, D. 2002b. "*Estudio Teórico - Experimental de las Propiedades de los Morteros de Junta para Albañilería*". Memoria de Título Ingeniero Civil en Obras civiles, Universidad de Santiago de Chile.
- BARRERA, H. L., P; FAÚNDEZ, D. 2002a. "*Estudio de los morteros de junta, según NCh 2256/1, bajo la óptica de la adherencia*". Universidad de Santiago de Chile.
- BECKER, E. A. n.d. CEMENTO PORTLAND CARACTERÍSTICAS Y RECOMENDACIONES DE USO.
- BECHER, S. 2013. *Desenvolvimento de argamassa para restauracao utilizando residuo do polimento do porcelanato*. Tesis de Doctorado, Universidad Federal do rio Grande Do.
- BLANCO, V., M. T; MARTÍNEZ, RAMÍREZ. 2012 "*Caracterización de morteros históricos*" Instituto de Geociencias, IGEO
- CAÑÓN, J. D. 2012. *Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- CASTILLO, R. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CEMCO 2007. La innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de la construcción. Durabilidad y conservación del patrimonio. *Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*.
- COURARD, L., DARIMONT, A. & SCHOUTERDEN, M. F., F.; WILLEM, X.; DEGEIMBRE, R. 2003. Durability of mortars modified with metakaolin. *Cement and Concrete Research.*, 33, at page 1473.
- EVANGELISTA, N. 2011. "*Estudo da utilização de resíduos industriais de lâ cerâmica e lâ de vidro em argamassas e concretos*". Tesis de Doctorado, Universidad Federal de Ouro Prato.
- FERNÁNDEZ, L. 2013. "*Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínker a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales.*". Tesis de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" De Las Villas.
- FERNANDEZ LOPEZ, R. 2009. *Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries*. POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- HERNBOSTEL, C. 2002. "*Materiales para construcción, tipos, usos y aplicaciones.*", México: Limusa.

- KANAN, M. I. 2009. *Morteros originales y morteros de reposición en Charola, A. et al., MANUAL BASICO DE CONSERVACION PARA LAS MISIONES JESUITICAS*, New York.
- LANA, M. J. 2005. El mercado CE en los morteros de albañilería.
- LOURENÇO, G. M. M. 2014. *"Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica"*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- MARÍA, A. 2014. "Establecimiento de criterios de compatibilidad de materiales de reparación basados en ensayos acelerados de durabilidad in-situ".
- MARTÍNEZ, S., PUERTAS MAROTO, F. Y M. T. BLANCO VARELA. 1995. *"Repair mortars based on lime. Accelerated aging test"* [Online]. *Materiales de Construcción* [En línea] Available: <http://materconstrucc.revistas.csic.es> [Accessed 18 de marzo 2016].
- MARTIRENA, F. 2011. "Reporte sobre Estudio de factibilidad para la producción de metakaolín en Cuba". *Cuba*.
- MARTIRENA, J. F. 2003. *"Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa"*. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Las Villas (UCLV).
- MARTIRENA, J. F. 2015. La producción local del cemento de bajo carbono LC3. *Primer taller regional de capacitación en la producción local del cemento de bajo carbono LC3*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MAS, X. 2006. *"Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales."*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València.
- MATHIEU, A. 2013. *"Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone"*. POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- MEGAT, J. 2011. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*.
- MENA, K. 2013. *"Evaluación de hormigones a partir del uso de nuevos aglomerantes ternarios sobre la base del sistema clínker- arcilla calcinada-carbonato de calcio."*. Tesis de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MIRAVETE, A., LARRODÉ, E., CASTEJÓN, L., CLEMENTE, R., JIMÉNEZ, M. A., LIZARANZU, M., CUARTERO, J., REVUELTA, D., MILLÁN, C., CALVO, J.,

- TOLOSANA, N. & PERALTA, J. L. 2000. Materiales compuestos I y II.: INO Reproducciones S.A. .
- MORALES, G. 2010. Influencia del empleo de sulfato de sodio como activador químico en morteros de cemento con adiciones cal-puzolana. UCLV.
- MORANTE, P., A. A. 2008. *Mejora de la adherencia mortero-ladrillo de concreto*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Facultad De Ciencias E Ingeniería De La Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- MOREJÓN, L. 2015. *"Morteros de cemento con Adición de humo de sílice y nanosílice"*. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid.
- N.A 2007. Tema 4: Morteros de Construcción y Ornamentación.
- NC54-285: 1984. Materiales y productos de la construcción. Cal viva. Especificaciones de calidad. Ciudad de la Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC172 2002. Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC175 2002. Morteros de albañilería. Especificaciones. Ciudad de la Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC566 2007. MORTEROS DE CAL — ESPECIFICACIONES, PREPARACIÓN Y APLICACIÓN. Ciudad de la Habana: Oficina Nacional de Normalización
- NC567 2007. Mortero seco en polvo-Determinación de la densidad aparente. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC601 2008. Morteros de albañilería — determinación de la densidad aparente del mortero fresco (en 1015- 6:1999, mod). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-EN1015-10 2008. Morteros de albañilería-Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido (EN 1015-10:1999, IDT). . Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- ORRALA YAGUAL, F. A. & GÓMEZ SUÁREZ, F. G. 2015. *"Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de puzolana obtenida de la calcinación de residuos del cultivo de maíz producido en la provincia de santa elena"*. Tesis de Diploma, UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA.
- PERAZA ABREU, L. 2014. *"Aplicación del protocolo STADIUM® a hormigones producidos con cemento de bajo contenido de carbono (LCC)"*. UCLV.
- PÉREZ, A. 2012. *Fórum Ibérico de la Cal: La cal en la actualidad* [Online]. [Accessed 22 de marzo 2016].

- PÉREZ CABRERA, F. 2013. "Cuba, pionera en la producción de cemento ecológico". *Granma*, 26 de marzo.
- PÉREZ, D. Y. 2008. "*Ceniza Volcánica como Agregado en Morteros de Albañilería con Cal Apagada Artesanalmente*". Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Micoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- PORTA, A. n.d. "Formulaciones de cemento de fosfato con subproductos de Mg y su aplicación como material reparador".
- PORTO, A. D. A. 2005. *Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos*. Tesis Maestría, Universidade Federal da Paraíba.
- PRADO, R. H., CERECEDA, M. L., SPAIRANI BERRIO, Y. & TORTOSA, J. A. H. 2009. Estudio y caracterización de morteros para la restauración arquitectónica. Alicante.
- RABILERO, A. C. 1998. "Contribución a la comprensión de los aglomerantes de cal-puzolana". *Materiales-Construcción*, nº1. CIDC. La Habana (Cuba): 27-36
- REIRA, S. & GONÇALVES, M. A. S. 2010. *Análisis comparativo experimental de algunos morteros de restauración* Trabajo de Diploma, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (UPC).
- RILEM-I1 1980. Porosity accesible to water.
- RODRIGUEZ, O. 2003. Morteros Guía General. *Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero. Madrid. España S.A.*
- SABIR, B. B., WILD, S. & BAI, J. 2001. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review". *Cement and Concrete Composites. Elsevier Science. Oxford*, vol 23.
- SALAZAR, A. 2000. "*Guía práctica. Morteros de pega para muros de mampostería*".
- SALAZAR, A. 2002. "Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos". *Calí*.
- SÁNCHEZ, F. J. A. 2002. "Historia, caracterización y restauración de morteros.". *In: PEDRO CID. S.A.*
- SÁNCHEZ, J. A., BARRIOS, J., BARRIOS, Á. & DE ARELLANO AGUDO, A. R. 1997. The shrinkage in lime mortars.
- SCRIVENER, K. L. Y. K., R. J. 2008. Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research*. 38, 128–136.
- SEPULCRE, A. 2003. "Tópicos comunes en la elaboración y uso de los morteros de restauración de fábricas". *Pátina*.

- SEPULCRE, A. 2005. *"Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico"*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- SEQUEIRA, J. E. n.d. *"Temas aplicados a los materiales de construcción"*, La Habana, Cuba., Facultad de Arquitectura. CUJAE.
- TORRENS, R. Y. G. F. 1995. Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle. Zürich.: Office Fédéral des Routes.
- TURANLI, L., UZAL, B. & BEKTAS, F. 2005. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research* 35.
- VIZCAÍNO, L. M. 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer- arcilla calcinada- caliza*. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

## ANEXOS

### Anexo 1: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la resistencia a compresión a los 28 días de edad.

#### ANOVA Simple - Resistencia a compresión 28 días por Tipo de cemento

Variable dependiente: Resistencia a compresión 28 días (MPa)

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Resistencia a compresión 28 días. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Resistencia a compresión 28 días para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

#### **Análisis de Varianza para Resistencia a compresión 28 días por Tipo de cemento**

<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	349.081	2	174.541	949.74	0.0000
Intra grupos	2.75667	15	0.183778		
Total (Corr.)	351.838	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Resistencia a compresión 28 días en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 949.737, 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 la media de Resistencia a compresión 28 días entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

#### **Tabla de Medias para Resistencia a compresión 28 días por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95.0%**

			<i>Error Est.</i>		
<i>Tipo de cemento</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>(s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
LC3 50(2:1)	6	6.35	0.175013	6.08623	6.61377
LC3 60(2:1)	6	5.23333	0.175013	4.96956	5.49711

PP 25	6	15.0833	0.175013	14.8196	15.3471
Total	18	8.88889			

Esta tabla muestra la media de Resistencia a compresión 28 días para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias. Pueden desplegarse estas medias e intervalos seleccionado Gráfico de Medias de la lista de opciones gráficas.

**Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a compresión 28 días por Tipo de cemento**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
LC3 60(2:1)	6	5.23333	X
LC3 50(2:1)	6	6.35	X
PP 25	6	15.0833	X

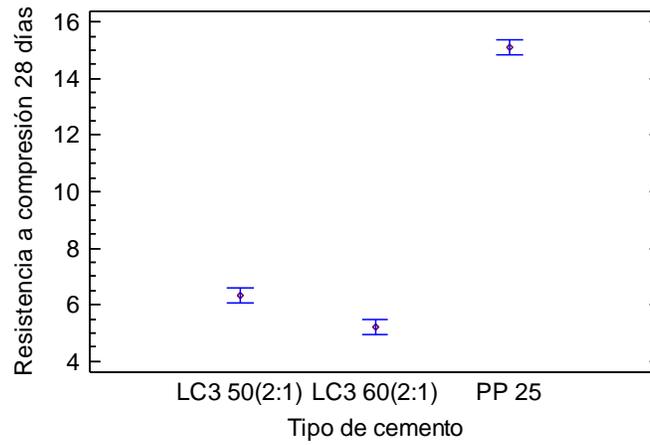
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3 50(2:1) - LC3 60(2:1)	*	1.11667	0.527548
LC3 50(2:1) - PP 25	*	-8.73333	0.527548
LC3 60(2:1) - PP 25	*	-9.85	0.527548

\* indica una diferencia significativa.

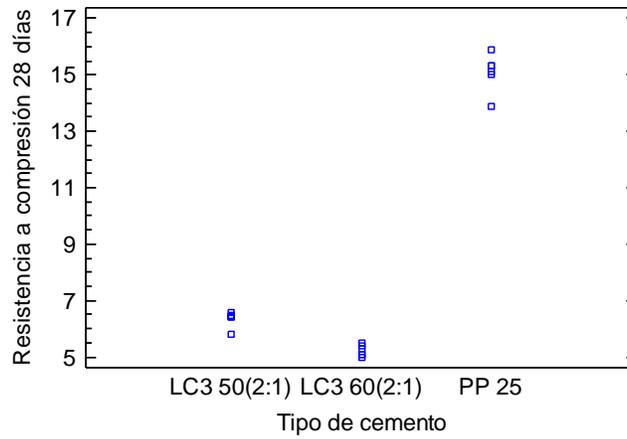
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran 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 y existen diferencias significativas entre ellos ya que no están en la 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.

**Resultados Gráficos:**

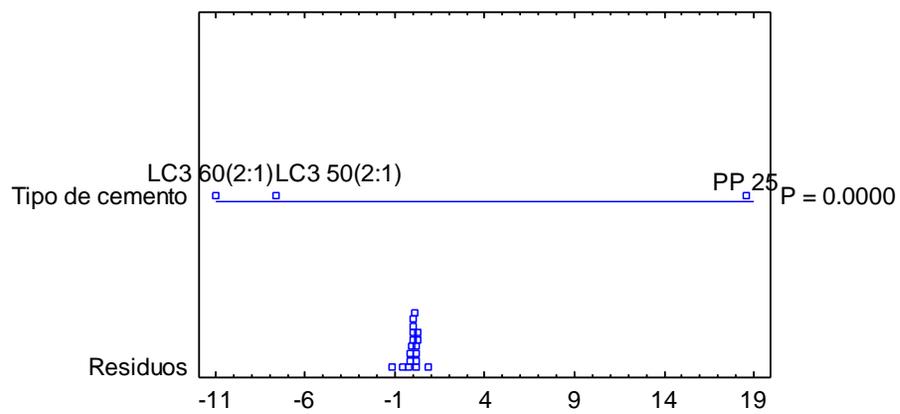
Medias y 95.0% de Fisher LSD



Dispersión por Código de Nivel



ANOVA Gráfico para Resistencia a compresión 28 días



## Anexo 2: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de ensayo.

### ANOVA Simple – Absorción de agua por Tipo de cemento

Variable dependiente: Absorción de agua (%)

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Resistencia a compresión 28 días. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Resistencia a compresión 28 días para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

Variable dependiente: Absorción de agua (g/cm<sup>2</sup>)

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

#### Tabla ANOVA para Absorción de agua por Tipo de cemento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4.32063	2	2.16032	26.63	0.0000
Intra grupos	1.21677	15	0.0811178		
Total (Corr.)	5.5374	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Absorción de agua en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 26.6319, 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 la media de Absorción de agua entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

#### Tabla de Medias para Absorción de agua por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95.0%

			Error Est.		
--	--	--	------------	--	--

Tipo de cemento	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
LC3 50(2:1)	6	2.20833	0.116274	2.03309	2.38358
LC3 60(2:1)	6	2.555	0.116274	2.37976	2.73024
PP 25	6	1.38667	0.116274	1.21142	1.56191
Total	18	2.05			

Esta tabla muestra la media de Absorción de agua para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas.

#### **Pruebas de Múltiple Rangos para Absorción de agua por Tipo de cemento**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
PP 25	6	1.38667	X
LC3 50(2:1)	6	2.20833	X
LC3 60(2:1)	6	2.555	X

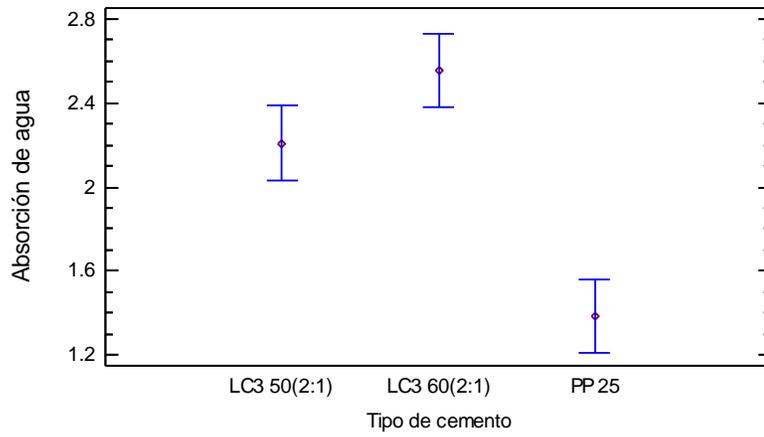
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3 50(2:1) - LC3 60(2:1)		-0.346667	0.350488
LC3 50(2:1) - PP 25	*	0.821667	0.350488
LC3 60(2:1) - PP 25	*	1.16833	0.350488

\* indica una diferencia significativa.

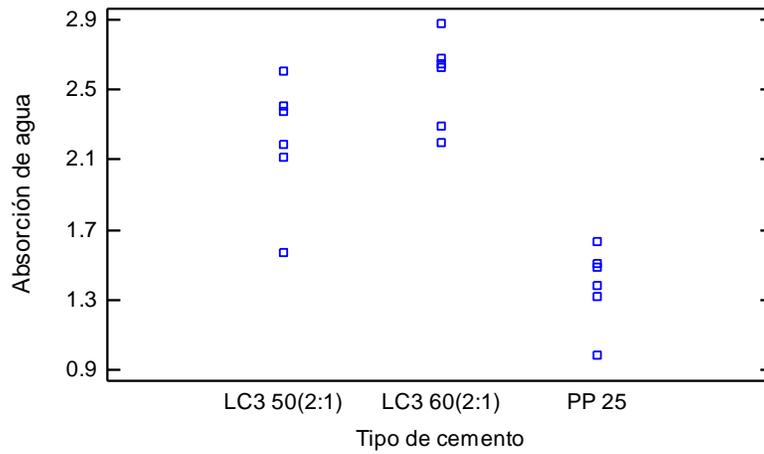
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran 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, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los cementos LC3 y la muestra patrón PP 25, pero no existen diferencias entre los dos cementos LC3. 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.

**Resultados Gráficos:**

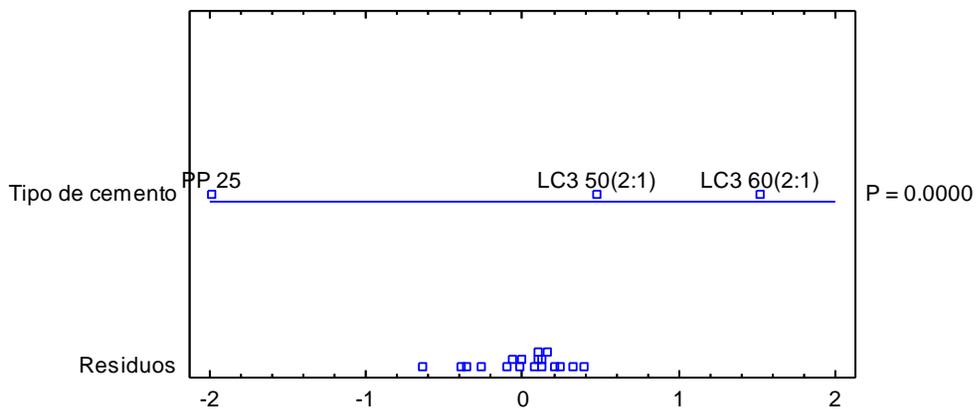
Medias y 95.0% de Fisher LSD



Dispersión por Código de Nivel



ANOVA Gráfico para Absorción de agua



### Anexo 3: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la densidad aparente en estado endurecido a los 28 días de ensayo.

#### ANOVA Simple - Densidad aparente 28 días por Tipo de cemento

Variable dependiente: Densidad aparente 28 días

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 27

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Densidad aparente 28 días. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Densidad aparente 28 días para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

**Tabla ANOVA para Densidad aparente 28 días por Tipo de cemento**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0668741	2	0.033437	372.29	0.0000
Intra grupos	0.00215556	24	0.0000898148		
Total (Corr.)	0.0690296	26			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Densidad aparente 28 días en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 372.289, 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 la media de Densidad aparente 28 días entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

**Tabla de Medias para Densidad aparente 28 días por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95.0%**

Tipo de cemento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
LC3 50(2:1)	9	1.92	0.00315902	1.91539	1.92461
LC3 60(2:1)	9	1.91778	0.00315902	1.91317	1.92239
PP 25	9	1.81333	0.00315902	1.80872	1.81794
Total	27	1.8837			

Esta tabla muestra la media de Densidad aparente 28 días para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas.

**Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad aparente 28 días por Tipo de cemento**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
PP 25	9	1.81333	X
LC3 60(2:1)	9	1.91778	X
LC3 50(2:1)	9	1.92	X

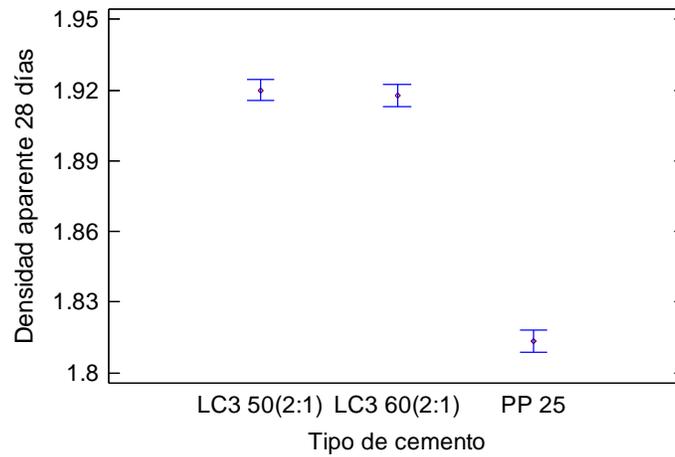
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3 50(2:1) - LC3 60(2:1)		0.00222222	0.00922055
LC3 50(2:1) - PP 25	*	0.106667	0.00922055
LC3 60(2:1) - PP 25	*	0.104444	0.00922055

\* indica una diferencia significativa.

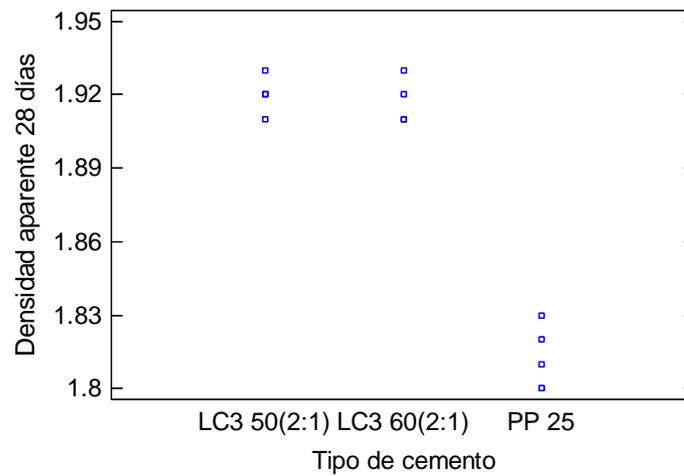
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran 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, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los cementos LC3 y la muestra patrón PP 25, pero no existen diferencias entre los dos cementos LC3. 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.

**Resultados Gráficos:**

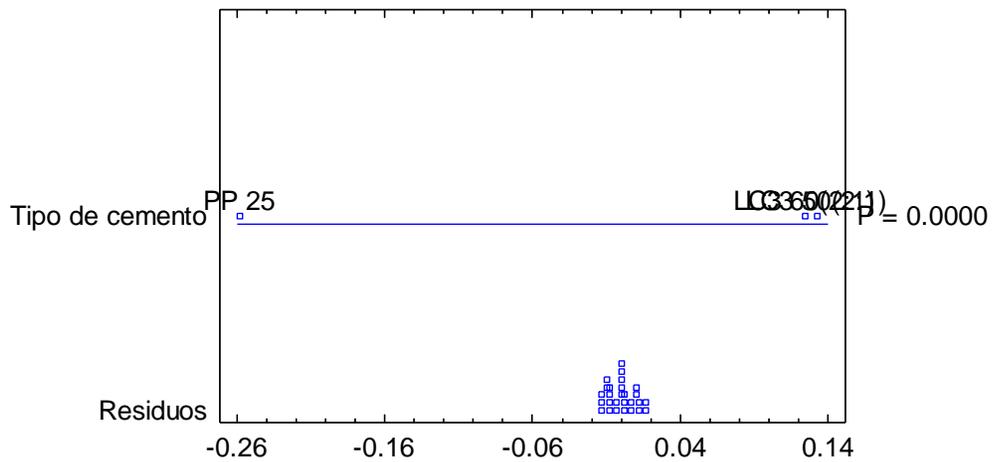
Medias y 95.0% de Fisher LSD



Dispersión por Código de Nivel



ANOVA Gráfico para Densidad aparente 28 días



#### **Anexo 4: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en el % de poros en estado endurecido a los 28 días de ensayo.**

##### **ANOVA Simple - % de Porosidad 28 días por Tipo de cemento**

Variable dependiente: % de Porosidad 28 días

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 27

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para % de Porosidad 28 días. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de % de Porosidad 28 días para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

##### **Tabla ANOVA para % de Porosidad 28 días por Tipo de cemento**

<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	7.85567	2	3.92784	62.18	0.0000
Intra grupos	1.51609	24	0.0631704		
Total (Corr.)	9.37176	26			

La tabla ANOVA descompone la varianza de % de Porosidad 28 días en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 62.1785, 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 la media de % de Porosidad 28 días entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

##### **Tabla de Medias para % de Porosidad 28 días por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95.0%**

<i>Tipo de cemento</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est. (s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
LC3 50(2:1)	9	25.1489	0.0837791	25.0266	25.2712
LC3 60(2:1)	9	25.3867	0.0837791	25.2644	25.5089
PP 25	9	26.3933	0.0837791	26.2711	26.5156
Total	27	25.643			

Esta tabla muestra la media de % de Porosidad 28 días para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad

de su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas.

**Pruebas de Múltiple Rangos para % de Porosidad 28 días por Tipo de cemento**

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Tipo de cemento</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
LC3 50(2:1)	9	25.1489	X
LC3 60(2:1)	9	25.3867	X
PP 25	9	26.3933	X

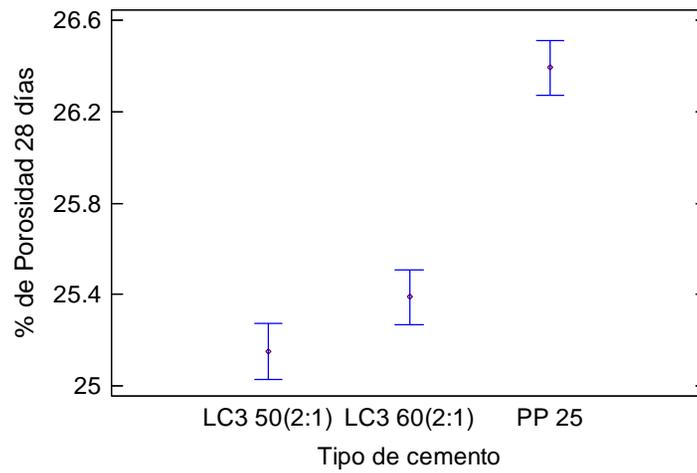
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
LC3 50(2:1) - LC3 60(2:1)		-0.237778	0.244534
LC3 50(2:1) - PP 25	*	-1.24444	0.244534
LC3 60(2:1) - PP 25	*	-1.00667	0.244534

\* indica una diferencia significativa.

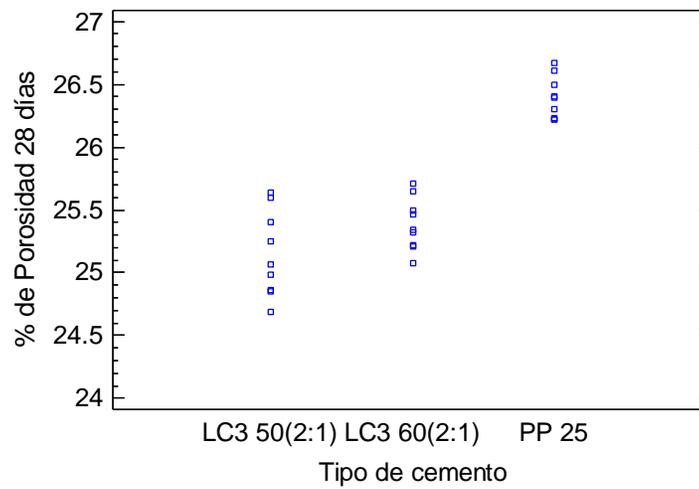
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran 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, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los cementos LC3 y la muestra patrón PP 25, pero no existen diferencias entre los dos cementos LC3. 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.

**Resultados Gráficos:**

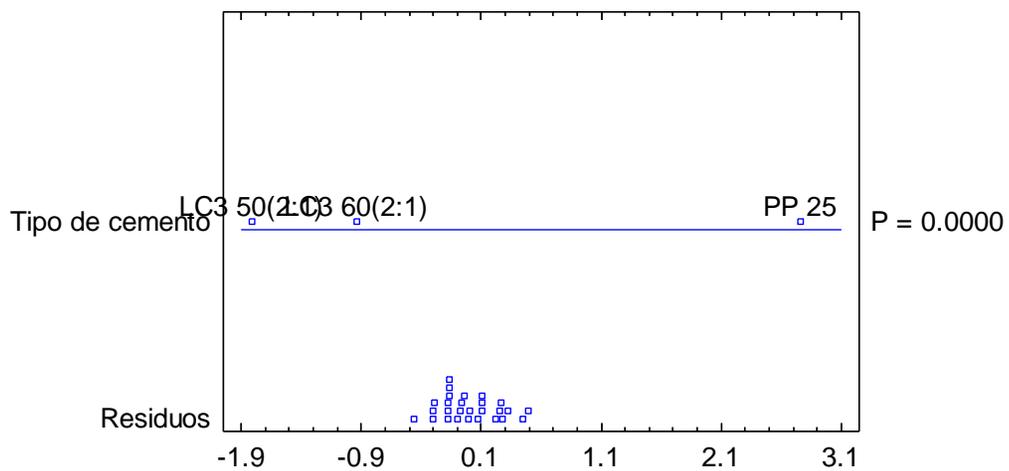
Medias y 95.0% de Fisher LSD



Dispersión por Código de Nivel



ANOVA Gráfico para % de Porosidad 28 días



## Anexo 5: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la permeabilidad al agua a los 28 días de ensayo.

### ANOVA Simple - Permeabilidad al agua por Tipo de cemento

Variable dependiente: Permeabilidad al agua (%)

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 11

Número de niveles: 2

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Permeabilidad al agua. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Permeabilidad al agua para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

**Tabla ANOVA para Permeabilidad al agua por Tipo de cemento**

<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	3.06436	1	3.06436	0.66	0.4367
Intra grupos	41.632	9	4.62578		
Total (Corr.)	44.6964	10			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Permeabilidad al agua en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.662454, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Permeabilidad al agua entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

**Tabla de Medias para Permeabilidad al agua por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95.0%**

			<i>Error Est.</i>		
<i>Tipo de cemento</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>(s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
LC3 50(2:1)	6	11.9	0.878045	10.4955	13.3045
LC3 60(2:1)	5	12.96	0.96185	11.4214	14.4986
Total	11	12.3818			

Esta tabla muestra la media de Permeabilidad al agua para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza

del 95,0% para cada una de las medias. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas.

**Pruebas de Múltiple Rangos para Permeabilidad al agua por Tipo de cemento**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
LC3 50(2:1)	6	11.9	X
LC3 60(2:1)	5	12.96	X

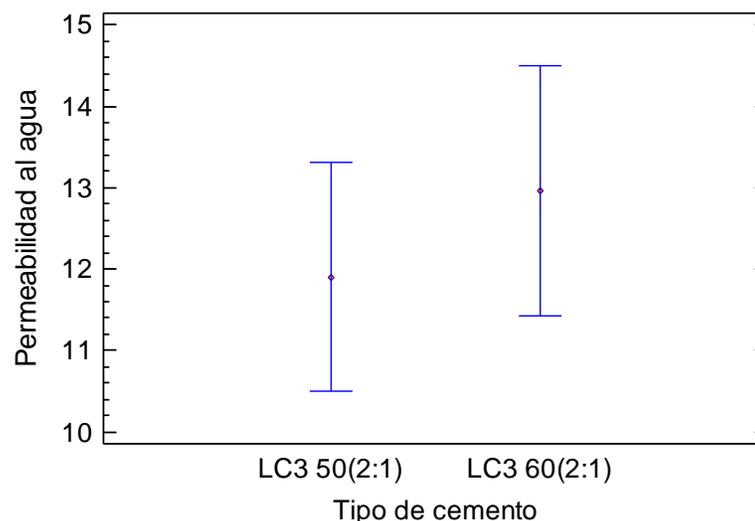
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3 50(2:1) - LC3 60(2:1)		-1.06	2.94613

\* indica una diferencia significativa.

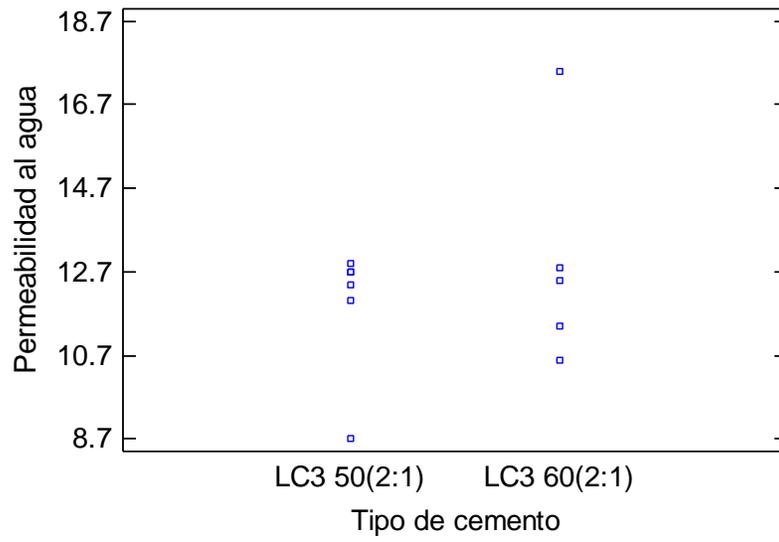
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre los cementos LC3. 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.

**Resultados Gráficos:**

Medias y 95.0% de Fisher LSD



Dispersión por Código de Nivel



ANOVA Gráfico para Permeabilidad al agua

