

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título Propuesta de un protocolo de investigación para evaluar la durabilidad de morteros de albañilería.

Autores Manuel Alejandro Díaz Borroto.

Tutores Dr. Arq. Dania Betancourt Cura.
Dr. Cs. José Fernando Martirena.

Santa Clara, junio 2018
Copyright©UCLV

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

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

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

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

“No existen países pequeños. La grandeza de un pueblo no se mide por el número de sus componentes, como no se mide por su estatura la grandeza de un hombre.”

Victor Hugo

A mi familia

A mi mama por todo su amor y cariño, por cuidarme y apoyarme en todo momento y sacrificar gran parte de su vida para traerme hasta donde estoy, por ser la mujer más fuerte q conozco y siempre poder ver el orgullo que siente por mi reflejado en sus ojos.

A mi papa porque sé que una de sus ilusiones más grandes es verme convertido en un profesional, por todo su apoyo y cariño, por ser el pilar fundamental de la familia y mantenerla siempre unida, por enseñarme que no hay tareas imposibles que con dedicación todo se puede lograr y a hacer siempre el bien sin importar sin importar nada.

A mi abuelo Jorge que, aunque ya no se encuentre a mi lado sé que estaría muy orgulloso de mi.

A mis padres que sin ellos hubiera sido imposible llegar hasta aquí.

A toda mi familia que de una forma u otra han estado involucrados durante todos estos años de estudio, por darme su apoyo y estar orgullosos de mí.

A Roberto por mantenerme siempre informado, sin su ayuda no creo que podría haber terminado a tiempo.

A mi tutora Dania por todas las horas de trabajo que ha dedicado a apoyarnos en esta investigación incluso teniendo problemas de salud, gracias por brindarnos tus conocimientos y tu apoyo.

A todos mis compañeros y compañeras con los que he compartido todos estos años y hemos vivido momentos únicos e inolvidables, por acompañarme durante todos estos años de sacrificio, pero que sin duda se ha convertido en una de las mejores etapas de toda la vida.

A los técnicos del laboratorio Yoel y a Felipe por sus consejos y sus regaños cuando estaba haciendo cosas mal.

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 consistió en la elaboración de un protocolo para evaluar el impacto de la cristalización de sales y el humedecimiento y secado en morteros de albañilería usando LC3 y P-35, para ello se realizaron una serie de ensayos físico-mecánicos de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC 175:2002.

Para analizar y valorar el comportamiento del LC3 y P-35 en los morteros de albañilería, se confeccionó un diseño experimental en el que se consideraron las definiciones de variables dependientes, estas respondiendo a las propiedades de los morteros en sus diferentes estados; la variable independiente, analizando factores como los cementos y los parámetros de estados los cuales son: tipo de mortero: (IV), cal y áridos (arena de El Purio).

Se caracterizaron las materias primas y se elaboraron 24 probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm para la realización de los ensayos de resistencia a flexo-compresión y absorción de agua por capilaridad.

El análisis de los resultados permitió validar el empleo del cemento LC3 en morteros de albañilería según las especificaciones exigidas por la normativa cubana y se planteó un protocolo para la evaluación de la durabilidad a muestras de morteros elaborados con cualquier aglomerante.

Palabras clave: morteros, protocolo, físico-mecánicos, cemento LC3.

Abstract

The present investigation consisted in the elaboration of a protocol to evaluate the impact of the crystallization of salts and the wetting and drying in masonry mortars using LC3 and P-35, for this a series of physico-mechanical tests were carried out in accordance with the specifications established in the Cuban standard NC 175: 2002.

To analyze and assess the behavior of LC3 and P-35 in masonry mortars, an experimental design was prepared in which the definitions of dependent variables were considered, this responding to the properties of the mortars in their different states, the independent variable, analyzing factors such as cements and state parameters which are: type of mortar: (IV) lime and aggregates (El Purio sand).

The raw materials were characterized and 24 prismatic samples of 40 x 40 x 160 mm were prepared for the performance of flexo-compression and water absorption tests by capillarity.

The analysis of the results made it possible to validate the use of LC3 cement in masonry mortars according to the specifications required by Cuban regulations and a protocol was proposed for the evaluation of the durability of samples of mortars made with any binder.

Keywords: mortars, protocol, physical-mechanical, cement LC3.

INDICE

Introducción	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO	4
1.1. Morteros. Generalidades	4
1.1.1. Clasificación de los morteros.....	4
1.1.2. Propiedades de los morteros	7
1.1.3. Dosificaciones de los morteros de albañilería.....	13
1.1.4. Métodos de ensayo para la evaluación de morteros de albañilería	14
1.1.5. Normas de especificaciones de calidad y ensayos a morteros	17
1.2 Morteros para la conservación de obras arquitectónicas. Generalidades	19
1.3 Cemento de bajo contenido de carbono (LC3)	19
1.3.1. Constituyentes del cemento LC3. Sistemas ternarios CPO-metacaolín-caliza.....	20
1.3.2. Propiedades del cemento LC3.....	20
1.3.3. Antecedentes del empleo de cemento LC3 en morteros de albañilería.....	21
1.4. Morteros. Comportamiento de la durabilidad.....	22
1.4.1. Formas de deterioro en morteros.....	22
1.4.2. Causas de deterioro de morteros.....	23
1.4.3. Ensayos de durabilidad a morteros a nivel de laboratorio	27
1.5. Conclusiones parciales	30
CAPÍTULO II. EMPLEO DE LOS CEMENTOS LC3-50 EN MORTEROS DE RESTAURACION.....	31
2.1 Generalidades.....	31
2.2 Diseño experimental	31
2.3 Obtención y caracterización de las materias primas	32
2.3.1. Árido.....	33
2.3.2. Cemento LC3-50 (2:1).....	34
2.3.3. Cemento P-35.....	40
2.3.4. La cal.....	42
2.3.5. El agua	43
2.3.6. Aditivo Sika Plast	43
2.4 Fabricación de las mezclas de morteros	43
2.4.1. Ensayo de consistencia. NC 170:2002	44
2.4.2. Proceso de fabricación de las probetas. NC 173:2002.....	44
2.5. Ensayos físico-mecánicos a probetas de morteros. Procedimientos.....	45

2.5.1. Resistencia a flexión y compresión. NC 173:2002 y NC 506:2007	45
2.5.2. Absorción de agua por capilaridad. NC 171:2002	46
2.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	47
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A MORTEROS DE ALBAÑILERÍA	48
3.1. Análisis de resultados de la consistencia de los morteros	48
3.2. Análisis de resultados de la resistencia mecánica de los morteros	48
3.3 Análisis de los resultados de la absorción de agua por capilaridad en los morteros.....	51
3.4 Protocolo para la realización de los ensayos de durabilidad	52
3.5 Conclusiones parciales del capítulo	54
Conclusiones generales.....	55
Recomendaciones	57
Bibliografía	58

Introducción

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, 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). Actualmente adquiere vital importancia mantener y rescatar las estructuras arquitectónicas y urbanas del pasado, bajo requerimientos presentes y principios de sostenibilidad social, económica, tecnológica, y de protección a la naturaleza (Álvarez, 2011). 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. Con el propósito de buscar nuevas alternativas se desarrollarán especiales formulaciones de morteros para la reparación con empleo de materiales localmente disponibles y costeables; los cuales se están estudiando en el centro de investigaciones CIDEM de la facultad de construcciones en La Universidad Marta Abreu de las Villas para la formulación de morteros de albañilería desde el 2013 con el objetivo de establecer nuevos criterios de compatibilidad del sistema mortero de reparación-sustrato. (Hernández González, 2015)

Situación problemática:

Esta se presenta debido a la existencia en el país de elevada cantidad de edificaciones patrimoniales con alto porcentaje de deterioro, fundamentalmente en morteros de unión y revestimiento. La acción de conservación con morteros actuales no ha tenido resultados positivos, su incompatibilidad con los materiales componentes del muro histórico han mantenido el deterioro existente y provocado daños mayores, evitando que desempeñen correctamente su función.

Problema científico:

Es necesario la elaboración de un protocolo que facilite la evaluación del impacto de la cristalización de sales y el humedecimiento y secado en morteros de albañilería elaborados con varios tipos de aglomerados.

Hipótesis de investigación:

Se elabora un protocolo que facilitara la evaluación del impacto de la cristalización de sales y el humedecimiento y secado en morteros de albañilería elaborados con varios tipos de aglomerantes.

Objetivo General:

Elaborar un protocolo para evaluar el impacto de la cristalización de sales y el humedecimiento y secado en morteros de albañilería usando LC3 y P-35.

Objetivos específicos:

1. Analizar antecedentes teóricos sobre las principales patologías que afectan a los morteros de albañilería.
2. Caracterizar los morteros en estado fresco y en estado endurecido según las normativas cubanas.
3. Formular un protocolo para la realización de ensayos de durabilidad a muestras de morteros elaborados con LC3 y P-35.

Tareas científicas:

1. Búsqueda bibliográfica que permita conocer el estado del arte de la temática a través de la revisión de literatura actualizada sobre el tema.
2. Selección y obtención de las materias primas a emplear en la producción de morteros de albañilería.
3. Caracterización de las materias primas que se empelarán para la elaboración de los morteros.
4. Fabricación de morteros con aglomerantes ya diseñados, atendiendo a los requerimientos de la NC 175:2002 *Morteros de Albañilería. Especificaciones*.
5. Preparación de muestras de morteros de albañilería con sustratos de hormigón utilizando los cementos P-35 y LC3.
6. Análisis del comportamiento de los cementos P-35 y LC3 en morteros de albañilería a partir de los resultados obtenidos mediante la realización de diferentes ensayos físico-mecánicos.
7. Elaborar un protocolo para la realización de ensayos de durabilidad a muestras de morteros elaborados con LC3 y P-35.

Novedad Científica: Se elabora un protocolo de morteros con sustratos de hormigón para evaluar el impacto de la cristalización de sales y el humedecimiento y secado usando varios tipos de aglomerantes.

Aporte Práctico:

Se demuestra que las nuevas alternativas de materiales sustituyentes del clínquer de Cemento Portland, constituyen materias primas económicas y de abundante existencia en el país que validan el uso en morteros de albañilería a través de la realización de ensayos físico-mecánicos y se propone un protocolo para la evaluación de ensayos de durabilidad a morteros elaborados con diferentes aglomerantes.

Estructura de los capítulos:

Capítulo 1: Marco teórico y metodológico.

Se realiza un análisis de las fuentes bibliográficas consultadas acerca de morteros de albañilería, los diferentes tipos de morteros que existen y las posibles dosificaciones a emplear para su fabricación. Se resumen los principales problemas de durabilidad que presentan los morteros, así como las causas de estos. Se presentan además los conceptos y definiciones fundamentales referidos al uso de materiales cementicios suplementarios, así como las potencialidades de los mismos en la fabricación de morteros de albañilería.

Capítulo 2: Empleo del cemento LC3 en morteros de albañilería.

Se expone el trabajo experimental a partir del empleo de las dosificaciones planteadas en la NC175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones* y se caracterizan las materias primas que se utilizaron para la fabricación de morteros elaborados con P-35 y LC3.

Capítulo 3: Análisis de resultados de los ensayos a morteros de albañilería.

Se exponen los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexo-compresión, absorción de agua por capilaridad y fluidez a los morteros de albañilería, para determinar si el empleo del cemento LC3 cumple las especificaciones de calidad establecidas en la norma NC 175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones*. Se prepararon los espécimenes para realizar posteriormente el ensayo de Pull out y cristalización de sales. Se elaboró un protocolo para la evaluación de ensayos de durabilidad a morteros elaborados con diferentes aglomerantes.

Luego se presentan las conclusiones, las recomendaciones y la bibliografía del trabajo.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. Morteros. Generalidades

Según la norma cubana (NC175, 2002) define como 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. Dichas mezclas deben ser homogéneas y sus componentes se deben utilizar en unas proporciones determinadas de acuerdo con la utilización prevista del mortero.(AFAM.a.)

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)

1.1.1. Clasificación de los morteros

Dentro del término mortero se incluyen a todos los materiales que se emplean en los trabajos de albañilería y en los revocos externos y enlucidos, así como en los de reparación. El primer grupo, es decir los morteros de albañilería, comprende los morteros de uso corriente para utilizarlos en la construcción de obras de fábrica; los morteros para junta fina y los morteros ligeros.(Hernández González, 2015)

➤ Según la (NC175, 2002) los morteros se pueden clasificar según el lugar de colocación:
Morteros de revestimientos o repellos: son los morteros que se utilizan en el revestimiento de paredes y techos

Morteros de colocación: Mortero que se utiliza para unir elementos (ladrillos, bloques, celosías, otros).

➤ Según el sistema de fabricación:

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 semiterminado: 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.

➤ Según (Álvarez, 2011), se clasifican atendiendo al tipo de aplicación en:

Morteros para determinar la calidad de los cementos: Empleados para evaluar la resistencia mecánica de los cementos; están formados por 4 fracciones bien definidas de una arena específica de naturaleza silícea (arena normalizada), proporción 3:1 (arena: cemento) y relación agua/cemento igual a 0.5 (NC 506:2007).

Morteros de albañilería: Son los más empleados en la colocación de elementos (ladrillos, bloques, rasillas, celosías, etc.) y en el revestimiento de edificaciones. El mortero influye en las propiedades estructurales de la mampostería, a la vez que reduce su permeabilidad. Los morteros de albañilería tienen diferencias importantes según su estado: morteros plásticos y endurecidos. En la NC 175:2002, se plantean las especificaciones que deben cumplir estos.

Morteros especiales:

- Cola: Constituidos por aglomerantes, generalmente cemento blanco o gris o una mezcla de ambos, áridos finos de naturaleza calcárea o silícea libres de arcillas y materias orgánicas con granulometría bien determinada y compensada, y aditivos que confieren al mortero las propiedades deseadas (NC 484:2006).
- Monocapa: Se emplean como revestimiento de muros; se coloca en varias capas sucesivas (salpicado, resano y fino) y posteriormente se aplica pintura decorativa como acabado final (Lana, 2005).
Proyectados: Son aquellos cuyo tamaño máximo de árido puede llegar hasta 8mm. Es aplicado a máquina mediante su proyección a gran velocidad sobre la superficie a través de una manguera y boquilla. En ocasiones se le adicionan fibras como refuerzo para mejorar sus propiedades. La proyección puede ser por vía seca o húmeda (Álvarez, 2011)

- **Autonivelantes:** Presentan una alta fluidez con baja relación agua/cemento. Son idóneos para la colocación de pavimentos, morteros de nivelación para pre-pisos y en reparaciones especiales del hormigón(Álvarez, 2011).
- **De relleno:** Generalmente no presentan retracción, e incluso algunos generan expansión durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Se emplean en estado semi-seco en lugares donde se coloca por retacado, para rellenar las vainas de los cables de elementos postensados, relleno de bases para pernos en equipos, etc.(Andres and Bravo, 2016) (Aguilar, 2007).
- **Aligerados:** Se emplean generalmente como material aislante térmico y acústico, niveladores de pendientes, rellenos en cubiertas antes de colocar la soladura y relleno de zanjas. Su aligeramiento puede ser provocado por el empleo de áridos de baja densidad como la kerancita, arcillas expandidas y puzolanas, o por la incorporación de ocluros de aire(Lana, 2005).
- **Poliméricos:** Se emplean como revestimiento. En ellos el cemento es sustituido parcial o totalmente por polímeros que generalmente están compuestos por resina (Mas, 2006).

➤ También se pueden clasificar según la naturaleza del conglomerante 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).

1.1.2. Propiedades de los morteros

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)

1.1.2.1. Propiedades en estado fresco

➤ **La consistencia:**

En un mortero define la manejabilidad o laborabilidad del mismo la cual es una de sus características más importantes. 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. En algunos manuales se denomina plasticidad, pero ésta es un grado de consistencia. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como de las condiciones ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc. La laborabilidad se logra con morteros de consistencia plástica, que permiten a la pasta conglomerante bañar la superficie del árido. En los otros casos se forman morteros excesivamente secos no trabajables; o bien, muy fluidos con tendencia a la segregación. 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. El exceso de agua produce frecuentemente la exudación, fenómeno por el que el agua de la parte inferior se mueve hacia arriba especialmente cuando la granulometría tiene gran porcentaje de árido grueso que se deposita en la parte inferior. El resultado es una mezcla no homogénea con una posible merma en las propiedades finales del mortero endurecido esta mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes. La consistencia se determina por la mesa de sacudidas, de acuerdo al procedimiento de la Norma Europea UNE-EN 1015-3 (b), en nuestro país se determina 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.(b)

➤ **Retención de agua:**

Según AFAM(s.f.-a), es la capacidad del mortero de retener agua de amasado ante sollicitaciones externas de absorción o succión por parte de las unidades de albañilería. Esto permite que el mortero mantenga su plasticidad para que las unidades puedan ser cuidadosamente alineadas y niveladas sin romper el enlace, lo que hace que la retención de agua esté íntimamente relacionada con la laborabilidad, y por tanto que sea uno de los factores de mayor incidencia en la adherencia establecida en el sistema mortero-unidad.

En general, 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).

Según (Barrera, 2002a), el mejoramiento de la retención de agua del mortero puede lograrse mediante el empleo de arena con adecuada composición granulométrica, especialmente con mayor cantidad de partículas que pasan por el tamiz de 0.315mm, un mayor contenido de finos conduce a la disminución de tamaños de poros y aumento de la superficie específica, lo que implica una mayor área envolvente por donde se absorbe agua y, por ende, mayor retención de esta. También mediante una mayor dosis de cemento y uso de cementos más finos, mayor dosis de cal y empleo de cales más finas, uso de incorporadores de aire y plastificantes, empleo de adiciones finas tales como puzolanas y similares, y un incremento del tiempo de mezclado.

➤ **Contenido de aire:**

Permite explicar el comportamiento en estado fresco y endurecido del mortero. La presencia de aire en un mortero, puede darse por efectos mecánicos o por medio de aditivos incorporadores de aire. A medida que aumenta el contenido de aire mejora la laborabilidad y la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo; de forma contraria disminuye la resistencia mecánica, la adherencia y la impermeabilidad (Barrera et al., 2002b).

Tiempo de utilización:

Según la (NC175, 2002) es el tiempo durante el cual el mortero tiene suficiente laborabilidad para ser manipulado sin necesidad de adición de agua. También se define como el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio del fraguado. Responde al tiempo en minutos a partir del cual un mortero alcanza un límite definido de resistencia a ser penetrado con una sonda. Todas las características del mortero en estado fresco han de mantenerse durante este tiempo.(b)

➤ **Masa unitaria:**

Es un parámetro fundamental para determinar el contenido de aire atrapado en el mortero. Puede indicar además la resistencia; en caso de ser muy densa la mezcla es probable que la resistencia sea elevada (NC175, 2002).

➤ **Adherencia en estado fresco:**

Consiste en la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interfase mortero-base. Se refiere, por tanto, a la resistencia a la separación del mortero sobre su soporte. La adherencia del mortero fresco es debida a las propiedades reológicas de la pasta del conglomerante, donde la tensión superficial de la masa del mortero fresco es el factor clave para desarrollar este tipo de característica. La adherencia, antes de que el mortero endurezca, se incrementa cuanto mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos. Sin embargo, el exceso de estos componentes puede perjudicar otras propiedades.(b)

1.1.2.2. Propiedades en estado endurecido

Para la prescripción de los morteros a emplear en obra deben considerarse las acciones mecánicas previstas en el proyecto de forma tal que estas no alcancen su estado límite de agotamiento. Además, deben estimarse las acciones ambientales de tipo físico y químico que puedan deteriorar el material reduciendo su vida útil. De estas exigencias nace el estudio de las propiedades del mortero en estado endurecido.(b)

➤ **Resistencia mecánica**

El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento de unión resistente compartiendo las solicitaciones del sistema constructivo del que forma parte. El mortero utilizado en juntas debe soportar inicialmente las sucesivas hiladas de ladrillos o bloques. Luego, la resistencia del mortero influirá, por ejemplo, en la capacidad de una fábrica para soportar y transmitir las cargas a las que se ve sometida. Así mismo, el mortero para solados resistirá el peso de personas y enseres que se asienten sobre él.(b)

Resistencia a compresión:

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).

➤ **Retracción:**

Se presenta por reacciones químicas de hidratación de la pasta durante el fraguado y principio de endurecimiento. Debido a la pérdida de agua sobrante tras estos procesos de hidratación, se producen tensiones internas que dan lugar a disminuciones de volúmenes. 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.

Según AFAM (s.f.-a), se distinguen tres tipos de retracción:

Retracción plástica: Es la contracción por desecación durante el proceso de fraguado cuando el mortero no es capaz de transmitir ni soportar tensiones producidas por la rápida evaporación del agua. Da lugar a la fisuración de afogado; producida fundamentalmente en elementos superficiales de poco espesor, ante temperaturas elevadas con vientos secos y falta de curado.

Retracción hidráulica: Es la contracción del mortero por evaporación del agua producida al haber finalizado el fraguado. Si la retracción de secado es intensa causa un cambio volumétrico capaz de crear tensiones importantes en zonas impedidas de deformarse. Si se supera el valor de adherencia del mortero, ocasiona que los bordes de las fisuras se levanten y abarquillen. La retracción hidráulica de los morteros aumenta cuando la arena contiene mayor cantidad de finos, cuando se emplea elevado contenido de conglomerante (especialmente el cemento) o el mortero tiene baja retención de agua (Barrera et al., 2002b).

Retracción térmica: Es la contracción debido a la variación de temperatura del mortero durante el endurecimiento. Los morteros con bajo contenido de cemento sufren un incremento de temperatura menor y consecuentemente menores retracciones en caso de que el calor alcanzado al iniciarse el endurecimiento se deba a la reacción exotérmica de los granos de cemento.

Según (Barrera, 2002a) , existen recomendaciones aplicables tendientes a disminuir los efectos de la retracción: emplear arenas con distribuciones granulométricas balanceadas, evitar emplear áridos excesivamente finos, utilizar cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico y bajo calor de hidratación, disminuir la cantidad de cemento y agua, y cuidar las condiciones de curado mediante la mantención del mortero en un ambiente de alta humedad y sin cambios de temperatura.

➤ **Absorción de agua**

Afecta a los morteros que quedan expuestos directamente a la lluvia. Su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad del mortero que forma las juntas. Si el mortero es permeable al agua, transmitirá ésta hacia el interior originando la consiguiente aparición de humedades por filtración. Además, con la succión del agua exterior se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para la durabilidad del conjunto constructivo, como en el caso de las eflorescencias. La absorción depende de la estructura capilar del material, por tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará. La incorporación de aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes también contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros que los incorporan.(b)

➤ **Permeabilidad al agua:**

Es aquella propiedad del mortero que permite el paso de agua a través de su estructura interna por medio de dos mecanismos: presión hidrostática o capilaridad. La presión hidrostática es cuando el agua tiende a atravesar la masa del mortero, escurriendo a través de sus discontinuidades internas que se presentan en forma de fisuras o poros intercomunicados. En la capilaridad el desplazamiento del agua se produce debido a la existencia de microfisuras de tamaño capilar que permiten la ascensión del agua por efecto de la tensión superficial (Barrera, 2002a).

➤ **Adherencia en estado endurecido:**

Es la propiedad que poseen los morteros de adherirse a los materiales con los que se encuentra en contacto, absorbiendo tensiones normales y tangenciales de estos, e influyendo en la resistencia del conjunto. La adherencia se va perdiendo con el paso del tiempo debido a deformaciones diferenciales producidas en los distintos materiales que conforman la albañilería (Arriola, 2009, Morante Portocarrero, 2011).

Según (Barrera, 2002a), la adherencia depende de la interacción hídrica entre el mortero y la unidad, la laborabilidad del mortero, la retención de agua, los constituyentes del mortero y contenido de aire; además de las características de las unidades (succión, contenido y estructura de los poros capilares, textura de la superficie de la cara de asiento y contenido de humedad), la calidad del proceso constructivo y las condiciones de curado (temperatura, humedad relativa y viento).

Según (Morante Portocarrero, 2011), existen dos tipos de adherencia:

Química: Se fundamenta en la formación de enlaces químicos localizados en la superficie de contacto entre mortero y unidad.

Física: La adherencia de tipo físico-mecánica se fundamenta en la trabazón entre sólidos. El mortero se aplica en estado plástico sobre la superficie del soporte que debe ofrecer suficientes posibilidades de anclaje y porosidad, con rugosidad superficial y oquedades, para que el cemento disperso y disuelto del mortero de albañilería penetre en los poros de la unidad. Posteriormente, al formarse agujas de cemento hidratado y completarse el proceso de fraguado, se crean nuevos puntos de anclaje entre el mortero y la unidad.

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 (NC175, 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	---

1.1.4. Métodos de ensayo para la evaluación de morteros de albañilería

Para evaluar el comportamiento de las propiedades de los morteros se usan técnicas y realizan ensayos físicos, mecánicos y de durabilidad tanto en estado fresco como en estado endurecido. Según las normas vigentes en cada país se establecen propiedades específicas que deben cumplir los morteros de albañilería, a continuación, se explican cuáles son los métodos y ensayos utilizados para la determinación y evaluación de estas.

➤ **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 ± 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.

➤ **Densidad aparente:**

Se determina a los morteros de albañilería en estado de polvo seco, fresco y endurecido. En estado de polvo seco la densidad (ρ_m), en kg/m^3 de un mortero seco es el cociente de la masa (m) en kg y el volumen (V_v) en m^3 , que ocupa un mortero, cuando se introduce no compactado en un recipiente de una capacidad dada (NC 567:2007).

En morteros frescos, se determina dividiendo su masa por el volumen que ocupa cuando se introduce, o se introduce y compacta, de manera prescrita en un recipiente de medida con capacidad dada (NC 601:2008).

En estado endurecido, se divide la masa de una probeta secada en 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-EN 1015-10:2008).

➤ **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 $190 \text{ mm} \pm 5$ mm de diámetro (NC175, 2002).

➤ **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

➤ **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 (NC 172:2002).

➤ **Permeabilidad al agua:**

El método para su evaluación se puede determinar tanto en laboratorio como *in situ*, ofrece 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. La literatura técnica indica que existen diversos ensayos que pueden realizarse para este objeto, 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:**

Es un ensayo realizado a hormigones, pero aplicable en morteros y como propiedad está íntimamente ligada con la durabilidad de los mismos. Queda definido como el porcentaje del volumen de huecos intercomunicados con respecto al volumen total. El ensayo se realiza según la recomendación RILEM-11(1980).

➤ **Pull-out:**

El ensayo de Pull-Out, descrito en la ASTM C900-13 [2] y en la norma europea UNE-EN 12504-3 [3] consiste básicamente en la introducción previo al hormigonado, de un disco de $25 \pm 0,1$ mm de diámetro, con una barra fijada en el centro de una de sus caras, de forma tal que la barra sobresalga de la superficie de la pieza de hormigón. El ensayo consiste en determinar la fuerza necesaria para arrancar el disco una vez endurecido el hormigón. Existe una variante del método, en la que la placa metálica se coloca luego de endurecido el hormigón, utilizando una sonda especial y se dilata sin producir tensiones laterales. La fuerza de arrancamiento está relacionada con la resistencia a compresión del hormigón, por lo que se recomienda la ejecución de este ensayo para la estimación de la resistencia del hormigón a efectos de realizar postensados y desencofrados de la estructura.(Gavilán et al.)

1.1.5. Normas de especificaciones de calidad y ensayos a morteros

La normalización o estandarización es la redacción y aprobación de normas que regulan y unifican 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 169:02 Mortero fresco. Determinación de la capacidad de retención de agua.
- NC 170:02 Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas.
- NC 171:02 Morteros de albañilería. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- NC 172:02 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción.
- NC 173:02 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.
- NC 175:02 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 657:08 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 Morteros para la conservación de obras arquitectónicas. Generalidades

En la actualidad, las investigaciones llevadas a cabo en este campo recomiendan que los morteros de restauración deben asemejarse a los morteros originales en aspectos estéticos a los que van a reemplazar y adecuados a su función en el edificio, deben ser compatibles con el resto de elementos de fábrica (piedra, morteros, ladrillos, etc.) y poseer unas características físico-químicas y de resistencia a los agentes externos semejantes al resto de la obra, además de contar con unas propiedades de puesta en obra óptimas (laborabilidad, compacidad, docilidad, etc. Es por ello que se hace necesaria la realización de una evaluación previa de la calidad de estos materiales mediante ensayos normalizados de laboratorio. (AFAM.c, 2018)

Siempre que introducimos un mortero en una fábrica histórica hay que analizar la interacción mutua (debido a que la fábrica histórica es un material diferente del mortero de restauración) y su comportamiento frente a los agentes de deterioro de cualquier tipo. En este contexto cobra todo su sentido el concepto de mortero de sacrificio. El término expresa que los morteros “nuevos” han de ser capaces de evitar deterioros a la fábrica histórica a costa de su propia integridad y consecuentemente –si es necesario– deteriorarse antes que aquella. 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 (en el de nueva factura) que le den ese carácter “de sacrificio”.(Álvarez and Álvarez, 2010)

1.3 Cemento de bajo contenido de carbono (LC3)

El CPO se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor volumen de producción a nivel mundial. Debido a los altos volúmenes de producción, su elaboración está asociada a un alto consumo energético y a grandes volúmenes de emisiones de CO₂ a escala global, siendo el responsable de cerca del 7 % de las emisiones de CO₂ y del 5 % del consumo de energía en el sector industrial, factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental, siendo la producción de clínker el proceso que representa mayor consumo de energía y volúmenes de emisiones de CO₂; aunque se buscan alternativas para implementar procesos y tecnologías más eficientes para su producción, es el reemplazo de una porción de clínker con materiales cementicios suplementarios la manera más efectiva de reducir las emisiones de CO₂ y disminuir los

gastos energéticos, al mismo tiempo que puede mejorarse o mantenerse la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón, mortero, bloques, etc., obteniendo así notables beneficios ingenieriles, económicos y medioambientales (Martirena, 2015).

En aras de evaluar la influencia de arcillas activadas térmicamente como material puzolánico en la sustitución parcial del CPO, se crea el cemento LC3 como nueva tecnología desarrollada por un grupo de investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y Materiales de Construcción (CIDEM) en la provincia de Villa Clara desde el año 2009. Se caracteriza por ser un cemento ternario (CPO-arcillas calcinadas-carbonato de calcio) con un considerable potencial de ahorro de CO₂ (hasta 50%). Es una nueva tecnología que tiene la tarea de hacer frente a la creciente demanda de recursos y, al mismo tiempo reducir el impacto ambiental (Pérez Cabrera, 2013).

1.3.1. Constituyentes del cemento LC3. Sistemas ternarios CPO-metacaolín-caliza

El cemento de bajo contenido de carbono está compuesto por diferentes sustituciones de clínquer de 15, 30, 45, 60 y 75 %. Los otros constituyentes que para cada cemento varían son en el caso del LC3-45 es un 15% de carbonato de calcio dado por la piedra caliza, un 7% de yeso y el 30 % de arcillas caoliníticas de baja pureza como vía para producir puzolanas de alta reactividad, siendo este un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente a temperaturas con rango entre los 500°C y 900°C (metacaolín). Su empleo mezclado con el CPO 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 en el caso de sustitución de clínquer por un 30% de metacaolín y el uso de aditivo (Martirena, 2004).

En fecha reciente (Antoni et al., 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. La reacción sinérgica entre la alúmina presente en el metacaolín y el carbonato de calcio contenido en la caliza propician la formación de fases hemicarbo y monocarbo-aluminatos y consumen gran cantidad de hidróxido de calcio (portlandita) de la hidratación del CPO desde el primer día, lo que brinda mayor resistencia a las mezclas ternarias de metacaolín con caliza (Vizcaíno, 2014).

1.3.2. Propiedades del cemento LC3

El potencial, la eficiencia y la sostenibilidad del cemento LC3 se encuentran aún en estudio, registrándose resultados exitosos para la resistencia a compresión y la absorción de agua

en las producciones de bloques, baldosas y hormigones no estructurales (Fernandez Lopez, 2009). Ensayos realizados con la utilización de cemento B45 en la producción de bloques muestra un excelente potencial revelando un similar y hasta superior comportamiento a los bloques fabricados con cemento P-35, constituyendo así una viable alternativa para el país.

Contribuye en la mitigación de la contaminación ambiental con la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con el cemento Portland convencional. Su potencial se evidencia en el efecto sinérgico de la arcilla calcinada con el carbonato de calcio y al ser un cemento novedoso presenta beneficios, ya que en su producción se emplea la roca caliza sin calcinar, por lo que solo necesita temperaturas de calcinación de la arcilla que varían desde 750°C a 800°C y la necesaria para la obtención del clínquer, pero en menores cantidades, esto contribuye directamente a una disminución del consumo energético. Al emplear arcillas de baja pureza, se soluciona en gran medida el problema de la tierra al utilizar los desechos de las canteras ya existentes y no abrir nuevos pozos evitando estar en competencia con otras industrias como la del papel y la industria cerámica.

Hasta la actualidad se han realizado dos pruebas industriales del cemento de bajo contenido de carbono. En el caso del cemento SIG B45 se obtuvo mediante la realización de ensayos una reducción de la laborabilidad de los hormigones producidos con estos, siendo necesaria mayor cantidad de agua y/o aditivo superplastificantes para lograr la consistencia requerida en comparación con los hormigones producidos con cemento P-35 (Antoni, 2013).

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, grandes ventajas se esperan alcanzar de este nuevo sistema cementicio (Alvarez Ibarra, 2014).

1.3.3. Antecedentes del empleo de cemento LC3 en morteros de albañilería

En el trabajo de diploma de (Alvarez Ibarra, 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 μm . 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.

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.

1.4. Morteros. Comportamiento de la 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).

1.4.1. Formas de deterioro en morteros

La degradación de los morteros de revestimiento continuo se produce como consecuencia de cambios en su composición y/o estructura (cambios químicos, mineralógicos, etc.) al interactuar con el medio ambiente que lo rodea. Prueba de ello lo constituye la multitud de formas de alteración características que manifiesta el estado de conservación del material (Villanueva, s.f.).

Las diferentes morfologías de alteración que se aprecian en los morteros son: falta de adherencia al soporte, erosiones, disgregaciones, desprendimientos, lixiviación, fisuras, grietas, manchas, enmohecimientos, picaduras, ampollas, eflorescencias,

desagregaciones, escoriación, decoloración, estrado, alveolización, depósitos superficiales, etc. (Villanueva, s.f.).

1.4.2. Causas de deterioro de morteros

Los morteros como piedras artificiales que son, se destruyen por los mismos elementos que destruyen las piedras naturales, el material cementante y la piedra en su conjunto. La destrucción de los morteros debe referirse principalmente a la destrucción de cementos, cales, etc. (Sequeira).

Las alteraciones en morteros según (Mas, 2006), se pueden dividir en alteración física (cambios térmicos, acción del agua, acción del hielo y acción del viento), alteración química (sales solubles, contaminación atmosférica y costras) y alteración biológica (bacterias, algas, líquenes, musgos, plantas inferiores y superiores, insectos, mamíferos y aves). Según (CEMCO, 2007), las alteraciones que pueden experimentar los morteros dependen de factores intrínsecos internos (composición y características del conglomerantes o conglomerantes utilizados, de los áridos, del agua, así como de las adiciones y aditivos, etc.), factores externos (sustancias y disoluciones agresivas, suelos y agentes agresivos, contaminación atmosférica, cambios de temperatura, reacciones fotoquímicas, etc.), factores constructivos (geometría de la construcción, orientación, etc.) y factores derivados del hombre (restauraciones efectuadas, incultura, invasiones turísticas, etc.).

A continuación, se profundizará en los principales factores agresivos, teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado.

➤ **Cambios térmicos:**

Los cambios de temperatura en todos los materiales pétreos expuestos a la intemperie se traducen en variaciones de volumen (dilatación/contracción). Los morteros de revestimiento continuo están sometidos a fuertes variaciones de temperatura entre el día y la noche; al ser malos conductores del calor, las tensiones se acentúan entre las zonas sombreadas y las más iluminadas, y entre las capas superficiales y profundas, lo que da como resultado el cuarteamiento y hasta cierto punto la arenización de este. En algunos casos los coeficientes de dilatación del mortero difieren entre sí y se originan tensiones internas que conllevan a alteraciones tales como grietas, deformaciones, combaduras, etc. También al estar presente el agua en los poros del mortero que al calentarse produce una evaporación en superficie que provoca un movimiento de líquidos del interior al exterior. Si este ciclo es rápido y repetitivo, puede causar deterioro superficial, como exfoliación, microfisuras o descohesión de los granos del material (Mas, 2006).

➤ **Acción del agua:**

La presencia de agua en cualquiera de sus estados provoca, favorece o acelera el deterioro de los morteros. El agua actúa indirectamente como catalizador, favoreciendo las reacciones químicas y como vehículo de acceso de otros agentes de deterioro al interior del material. Actuando con otros agentes de alteración es capaz de provocar la degradación o evaporación del agua absorbida por acción del viento y el soleamiento. Además, la presencia de agua favorece el desarrollo de agentes biológicos como algas, bacterias, hongos, líquenes, plantas, etc., que modifican las características estéticas y funcionales del mortero de revestimiento (Ruiz-Agudo, 2007). En caso de que los morteros estén sometidos a la acción de aguas puras, esta puede actuar sobre los cementos de base yeso, cales y cementos de forma diferente, debido a que la solubilidad de los dos primeros es superior (CEMCO, 2007).

- Según (Mas, 2006), los fenómenos físicos que permiten el acceso de agua en morteros y unidad de soporte son:

Penetración directa: Suele deberse a la acción del agua de lluvia.

Absorción: Se produce por la penetración del agua en fase líquida a través de la red porosa del mortero como material poroso que es. El mecanismo de absorción se basa en la presión que ejerce el agua al intentar penetrar en los poros y fisuras frente al aire contenido en su interior. En la absorción se tiene en cuenta el principio de los vasos comunicantes, en el que se implica la fuerza de la gravedad o la presión que ejerce el viento (Corroto et al., 2012).

Higroscopía: En este caso, la penetración del agua en la red porosa sucede en fase de vapor, y es tomada directamente de la humedad atmosférica, creándose el denominado equilibrio higroscópico del material con el medio (Corroto et al., 2012).

Condensación: La condensación tiene lugar cuando el aire está húmedo y la superficie pétreo más fría que el punto de "rocío" o de condensación del aire a la temperatura que tiene su masa en general. Este fenómeno principalmente tiene lugar en los morteros de mayor densidad y conductividad térmica (Corroto et al., 2012).

Capilaridad: Se manifiesta por efecto de succión del agua en materiales porosos, donde absorbida por capilaridad penetra al interior de estos. En general, la altura o profundidad de penetración del agua dependerá del diámetro de los poros y de la evaporación que se produzca a través de la superficie externa del material (Hernández González, 2015). El fenómeno de capilaridad es resultado del ascenso y descenso de un líquido en el interior de los poros del mortero cuando este se encuentra sumergido y se debe a la existencia de

fuerzas de tensión superficial en la interface entre sustancias sólidas, líquidas y gaseosas en contacto (Corroto et al., 2012).

➤ **Contaminación atmosférica (meteorización):**

Para el caso de los materiales pétreos naturales y artificiales, viene referida al conjunto de productos presentes en el aire que pueden resultar perjudiciales para estos. La acción de la polución atmosférica, está muy relacionada con la meteorología ya que la temperatura, el viento, las radiaciones solares, la humedad y las precipitaciones pueden minimizar o incrementar la acción de esta; así como del microclima donde se encuentren situadas las edificaciones (Winkler, 1971).

En general los mecanismos que facilitan el acceso de los contaminantes atmosféricos en los morteros y en la unidad de soporte son la lluvia, la condensación, la fijación directa de los gases, la gravedad, la atracción electrostática, la termoforesis y el viento. La presencia del agua forma parte también de los mecanismos que permiten el acceso de los contaminantes, incluso actúa químicamente sobre los gases contaminantes disolviéndolos en forma de iones de carácter ácido capaces de actuar sobre las piedras, especialmente las de tendencia básica (Fort and Pérez-Monserrat, 2012).

Acción de la contaminación por dióxido de carbono (carbonatación): La principal alteración causada por la acción del CO_2 en los materiales pétreos naturales y artificiales, es la disolución de los carbonatos y la rápida descomposición de los silicatos. El hidróxido de calcio es, principalmente, el que desarrolla y mantiene elevado el pH de los morteros en presencia de iones OH^- , al reaccionar con el CO_2 y desaparecer parcial o totalmente dichos iones, se produce el descenso del pH que, en el caso de los morteros de cemento, llega ser inferior a 9. El proceso de carbonatación se verifica tanto más rápidamente cuanto más poroso es el mortero y cuanto mayor es el contenido de CO_2 de la atmósfera. Además el grado de saturación del mortero influye extraordinariamente en esta reacción, pues la difusión del CO_2 solo es posible en poros llenos de aire; por esta razón los morteros no se carbonatan cuando están totalmente saturados de agua; aunque la carbonatación se produce a máxima velocidad cuando los poros del mortero tienen un contenido de humedad intermedio, ya que se precisa la presencia de agua para el desarrollo de esta reacción, correspondiendo esta humedad relativa entre el 40 y el 80%. La carbonatación comienza en la superficie de los morteros y avanza lentamente hacia el interior; el carbonato de calcio formado llena los poros del mortero a la vez que forma una capa superficial protectora, lo que impide el avance de la reacción de carbonatación. Esta reacción tiene gran influencia en los morteros de cal apagada, ya que es la causa de su verdadero endurecimiento. Este

proceso también tiene lugar en morteros elaborados con cemento a base de clínquer Portland (Aguilar, 2007, CEMCO, 2007, Winkler, 1971).

Acción de la contaminación por dióxido de azufre (sulfatación y yesificación):

Son dos las fases en que se puede producir la reacción de oxidación del dióxido de azufre: en estado gaseoso y en estado líquido. Por un lado, la transformación en fase gaseosa de SO_2 en SO_3 se produce en presencia de luz siendo un mecanismo fotoquímico. Por otro lado, la reacción en estado líquido se da en las partículas de agua de humedad que, combinada con la acción catalítica de componentes contaminantes del polvo y cenizas transforman el dióxido de azufre en ácido sulfuroso (Détrie and Jarrault, 1969). Cuando se produce la oxidación de este ácido el resultado es ácido sulfúrico, manifestándose su efecto lesivo de dos maneras: formando sulfatos insolubles y como ácido fuerte. Esta disolución acuosa de ácido sulfúrico ataca al hidróxido de calcio o al carbonato de calcio formado por carbonatación de los morteros; dando como resultado la sulfatación de estos. Transformado el carbonato cálcico en yeso puede disolverse y lixivarse por el contacto con el agua de lluvia (yesificación); dicha solubilidad se agrava cuando están presentes otros tipos de sales, como cloruros característicos de ambientes costeros (Fort and Pérez-Monserrat, 2012)..

➤ **Acción del viento:**

Es un proceso puramente mecánico; en caso de que este traiga partículas sólidas en suspensión puede ejercer una erosión sobre los morteros de revestimiento. El desgaste del material dependerá de la dirección, fuerza, tiempo de actuación, porosidad, composición mineralógica, resistencia mecánica, etc. La velocidad del viento puede aumentar la evaporación superficial del agua presente en los morteros, favoreciendo la cristalización de sales solubles en el interior de la red porosa y aumentando su poder rompiente. Las corrientes de aire combinadas con otros agentes de deterioro pueden producir la desintegración directa de los morteros o participar indirectamente en nuevos estados de alteración, como la proliferación de bacterias, transporte de polución, lixiviación de componentes solubles, etc. (Mas, 2006).

➤ **Sales solubles:**

Las sales son compuestos iónicos capaces de disolverse en agua, cristalizar y aumentar de volumen al producirse la sobresaturación de la disolución. Suponen una alteración estética al cristalizar en la superficie del material y dependiendo de la concentración precipitada en el interior de la red porosa ejercer fuertes presiones mecánicas, llamadas presiones de cristalización sobre las paredes de los poros hasta acabar desmoronando el

mortero de revestimiento e incluso la unidad de soporte. Dentro de las más frecuentes están los sulfatos, cloruros, carbonatos de sodio, de potasio, de calcio y de magnesio, y nitrato de sodio de potasio y de calcio. Se caracterizan por mostrar diferente solubilidad y grado de hidratación en función del tipo de sal y de las condiciones del entorno (Ruiz-Agudo, 2007). La cristalización de sales se puede producir en el exterior por evaporación regular del agua que transporta las sales hasta la superficie del material, dando lugar a la formación de eflorescencias, que si son solubles podrán ser disueltas y arrastradas por el agua de lluvia. Si las condiciones de disolución son tales que su sobresaturación se produce en el interior del material, la cristalización tendrá lugar en el interior de este. Cuando se produce cercano a la superficie se le denomina sub-eflorescencia que le dan a la superficie aspecto blanquecino y causan ampollas, escamas, exfoliación o alveolización del material. Si se produce a mayor profundidad dentro del material se le denomina cripto-eflorescencia (Riera Juan and Gonçalves Soares, 2010). En el mecanismo lesivo de las sales solubles es determinante el tamaño de poros y la intercomunicación de los mismos, ello se traduce en cuanto mayor sea el número de poros de pequeño tamaño en el mortero, mayores serán los efectos destructivos de la cristalización (Fort and Pérez-Monserrat, 2012). En cuanto a las condiciones del ambiente en altas temperaturas y baja humedad relativa se producen bajas presiones de cristalización, sobre todo si las sales son pocos solubles (Ruiz-Agudo, 2007).

1.4.3. Ensayos de durabilidad a morteros a nivel de laboratorio

➤ Ensayo de profundidad de carbonatación:

Cuando el mortero está expuesto a CO_2 se origina una reacción que produce carbonatos que es acompañada por contracciones. La carbonatación provoca deterioro del material debido a la disminución del pH de la pasta cementicia. El método para determinar la profundidad de carbonatación se especifica para hormigones en la norma cubana NC 355:2004, pero es aplicable a morteros. Se someten los especímenes a una reducción de la alcalinidad mediante la aplicación de un indicador de color y en dependencia de las tonalidades que tome la misma se lleva a cabo las mediciones de las diferentes capas estimando sus valores de pH.

➤ Ensayo de cristalización de sales:

Para evaluar el deterioro causado por el ataque de sales solubles en el mortero, se realiza un ensayo de envejecimiento artificial acelerado mediante la cristalización de sales con una solución de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4). La metodología sigue las pautas que indica la norma UNE-EN 12370:1999.

La agresión por envejecimiento de ciclos de inmersión en solución salina (Na_2SO_4) se fundamenta en la penetración de sal en la estructura capilar de las probetas cada vez que se sumergen en la solución. Al secar las probetas, esta sal se deshidrata y al volver a hacer la inmersión, la sal presente en la red capilar se hidrata de nuevo incrementando su volumen.

Este ensayo permite la obtención de la variación de masa de las probetas en % que es la resistencia a la cristalización de sales. Este aumento de volumen de los cristales a lo largo de ciclos de inmersión genera tensiones que pueden llegar a romper la estructura capilar aumentando la porosidad de la probeta y produciendo la pérdida progresiva de masa por agrietamiento y desprendimiento de material (Álvarez, 2011, Riera Juan and Gonçalves Soares, 2010).

➤ **Ensayo de ciclos de humedad-secado:**

Según la normativa india UDC 666-97:620-11:1991, este método de prueba establece el procedimiento para la determinación de la variación de longitud en especímenes de concreto, debido a cambios del contenido de humedad. El ensayo está relacionado con pruebas entre especímenes fundidos en laboratorio y especímenes tomados de estructuras o unidades, cuando el tamaño máximo nominal del agregado en ambos no excede los 38mm.

Se plantea además un método propuesto para materiales pétreos naturales y artificiales según (Álvarez, 2011), que consiste en la repetición de 15 veces un ciclo que incluye la inmersión en agua, el secado en estufa de las probetas hasta masa constante, enfriamiento y por último pesaje y observaciones de las probetas para obtener las variaciones de masa por pérdida de hidróxido de calcio poco soluble presente en el mortero.

➤ **Lixiviación de sales:**

La lixiviación produce el desplazamiento de sustancias solubles o de alta dispersión. Es un proceso en el cual se extrae uno o varios solutos, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido (Anon, 2011).

Debido a la complejidad del proceso de lixiviación se hace necesario el uso de simplificaciones, entonces los ensayos de lixiviación de sales se dividen en tres categorías: ensayos de caracterización básica, ensayos de conformidad y ensayos de verificación in situ; estos serán elegidos en función de las condiciones en que el material ejerce su función.

Dado que la reproducción exacta de los escenarios reales es muy costosa, se realizan ensayos de laboratorio en condiciones que se aproximen lo más posible a las reales. Los ensayos de laboratorio pueden ser de lixiviación de equilibrio (muestras con tamaño de partículas muy reducido) o basados en la transferencia de masa (elementos monolíticos). Se hace necesario la consideración de la naturaleza del material y el medio que lo lixivía; el medio lixivante puede ser más o menos agresivo dependiendo del pH y la naturaleza de las sustancias disueltas o en suspensión, la temperatura y viscosidad y el régimen del medio lixivante (ensayo estático o dinámico) (Hernández González, 2015).

Según CEMCO (2007), se realiza a materiales monolíticos normalmente a morteros, mediante un ensayo de difusión a materiales monolíticos, conocido como ensayo de lixiviación de tanque; se basa en la simulación de un ambiente realista, en donde ocurre la lixiviación de las pastas de cemento liberando contaminantes al exterior. Consiste en introducir el material en un recipiente con el agente lixivante, de forma que este cubra totalmente la superficie del material, cuya forma será monolítica con dimensiones fijas. Es un ensayo de lixiviación de laboratorio estático descrito por la norma holandesa NEN 7345:1995, en donde se muestran las especificaciones y el procedimiento a seguir.

➤ **Ensayo de intemperismo:**

Por medio de este ensayo se mide la acción combinada de todos los elementos de la naturaleza que afectan el mortero: lluvia, clima, tiempo, viento, ácidos y sales (anhídrido carbónico, cloruro de sodio y ácido sulfúrico), bacterias y hongos los cuales generan cambios de volumen debido a la formación de sales o al cambio de temperatura y humedad, desgaste superficial por acción del viento y la lluvia y grietas motivadas por expansiones y contracciones (Álvarez, 2011). Este ensayo consiste en colocar muestras del mortero una vez endurecido y transcurrido 28 días de curado a la intemperie, realizándose mediciones del porcentaje de grietas y erosión respecto al tiempo. Las mediciones se realizan colocando sobre el mortero una hoja cuadrículada transparente y medir el número de cuadrículas en las cuales aparecen las grietas o la erosión, expresándose los resultados en porcentaje.

1.5. Conclusiones parciales

1. Dentro de las principales patologías que se aprecian en los morteros están la falta de adherencia al soporte, erosiones, desprendimientos, lixiviación, fisuras, grietas, manchas, enmohecimientos, ampollas, eflorescencias, desagregaciones, depósitos superficiales entre otras.
2. 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.
3. La resistencia de los morteros es uno entre varios factores importantes ya que su desempeño fundamental radica en el mejoramiento de las propiedades que se ven afectadas cuando se pone en contacto con sustratos porosos y absorbentes; de ahí la necesidad del estudio de la durabilidad, aplicando diferentes ensayos tales como el ensayo de humedecido y secado, cristalización de sales, profundidad de carbonatación, lixiviación de sales entre otros.
4. El uso de nuevas formulaciones de morteros producidas a partir de cemento LC3 con sustituciones de clínquer por una mezcla de arcilla calcinada y caliza, constituye una opción muy interesante para el uso en morteros de albañilería ya que reduce los niveles de emisiones de CO₂ a la atmósfera y los consumos energéticos de la producción del CPO y además 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 EN MORTEROS DE RESTAURACION

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*, empleando cementos ternarios con sustituciones del 50% de clínquer por arcilla calcinada y caliza en proporción 2:1, tendiendo como patrón de comparación el cemento P-35. También, se describen y realizan los ensayos físico-mecánicos a los morteros elaborados con el cemento LC3-50 (2:1) para evaluar posteriormente sus propiedades en estado fresco y endurecido.

2.2 Diseño experimental

El diseño de experimento se realizó con el fin de evaluar la influencia del cemento LC3 a morteros de albañilería con presencia de cal, siguiendo los criterios establecidos en la NC175, 2002.

Metodología del diseño experimental:

- 1) Obtención de los materiales constituyentes de los morteros a elaborar.
- 2) Realización de los ensayos de caracterización a las materias primas: árido, cemento, cal, yeso, arcilla y caliza.
- 3) Producción de la adición LC2 (dosificación y molienda).
- 4) Mezclar el LC2 con P-35 y preparar el LC3.
- 5) Fabricación de morteros de albañilería tipo IV fijando la fluidez y atendiendo a las dosificaciones y parámetros establecidos en la NC175, 2002.
- 6) Elaboración de 24 probetas de 40 x 40 x 160 mm, para la realización de los siguientes ensayos:
 - Resistencia mecánica a flexo-compresión a los 3 días, (3 ensayos por serie de mortero).
 - Resistencia mecánica a flexo-compresión a los 7 días, (3 ensayos por serie de mortero).
 - Resistencia mecánica a flexo-compresión a los 28 días, (3 ensayos por serie de mortero).
 - Absorción de agua por capilaridad a los 28 días, (3 ensayos por serie de mortero).
- 7) Evaluación de los resultados obtenidos.

Para el diseño de las mezclas se empleó el mortero tipo IV 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.

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
- Consistencia

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

- ✓ Cementos: LC3-50 (2:1) y P35 con 1 nivel de variación.

Parámetros de estado:

- ✓ Tipo de mortero: (IV).
- ✓ Árido: (arena de El Purio).
- ✓ Cal.

Para el diseño de las mezclas se empleó el mortero tipo IV con una proporción volumétrica de 1:4:1 (cemento–arena–cal) según plantea la NC 175:2002 el cual puede emplearse en muros portantes y de cierre, bajo el nivel del terreno como muro de fundición y de contención

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) producido en el laboratorio de materiales de la Facultad de construcciones de la UCLV y el P-35 de la Fábrica de Cemento Karl Marx de la provincia de Cienfuegos mostrados en la (Fig. 2.1 b y c). El hidrato de cal fue adquirido en la Empresa de Materiales de la Construcción procedente de la cantera Palenque en Villa Clara mostrado en la (Fig. 2.1 d)

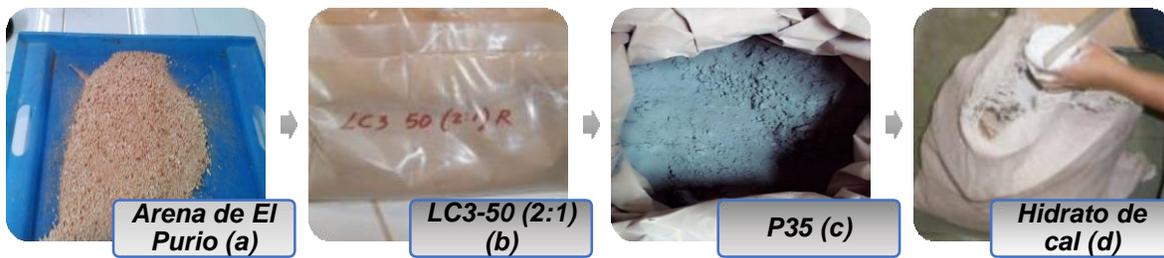


Figura 2.1: Materias primas empleadas (a, b, c y d).

2.3.1. Árido

Los áridos fueron caracterizados en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Construcción en la Facultad de Construcciones de la UCLV. 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	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2.3	≤ 5.0
Partículas de Arcillas (%)		
Partículas Planas y Alargadas (%)		
Impurezas Orgánicas		
Pesos Específicos Corriente	2.56	≤ 2.50
Pesos Específicos Saturado	2.61	
Pesos Específicos Aparente	2.7	
Absorción (%)	2.27	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1495.5321	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1626.7255	
Porcentaje de Huecos (%)	36.33	
Módulo de Finura	3.37	2.20 – 3.58

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

	Tamiz N°										
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 µm	300 µm	150 µm	74 µm
% Pasado				100	100	69	50	27	15	3	
NC 251:2013				100	90- 100	70- 100	45- 80	25- 60	10- 30	2- 10	

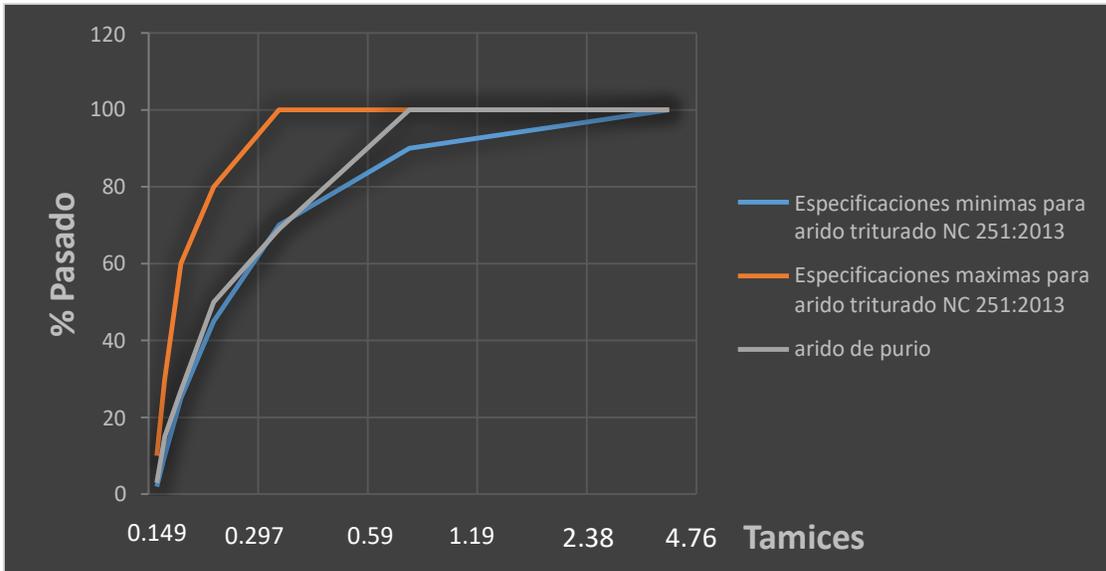


Figura 2.2: Gráfico de curvas granulométricas. Comparación con las especificaciones de la NC 251:2013

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 251:2013. 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.

2.3.2. Cemento LC3-50 (2:1)

Para la elaboración de una de las series de morteros se empleó el cemento LC3-50 (2:1). En este caso el LC3 se produjo a escala de laboratorio en la Facultad de Construcciones de la UCLV, en la Tabla 2.2 se observan los porcentajes de cada materia prima empleada.

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

Cementos	Proporciones de las materias primas (%)	
	P-35	adición mineral LC2
LC3-50 (2:1)	50	50

2.3.2.1. Formulación de la adición mineral activa LC²

La adición se define como un material inorgánico finamente dividido (ni árido, ni conglomerante) que se puede añadir al mortero para mejorar determinadas propiedades u obtener ciertas propiedades particulares.

Para la producción de la adición LC2 se utilizó arcilla proveniente de El Yigre que fue calcinada a 800°C, yeso y caliza.

Primeramente se calculó la proporción en que debían mezclarse estos materiales, siendo la siguiente: 60% de arcilla calcinada, 30% de caliza y 10% de yeso (Figura 2.5 a).

Conocida la proporción, estos materiales fueron secados en la estufa a 109°C durante 24 horas para eliminar la humedad que pudieran presentar (Figura 2.5 b) y posteriormente se inició un proceso de molienda (Figura 2.5 c) que duró alrededor de dos horas.

En este tiempo la adición no alcanzó la finura requerida, tomándose como criterio de molienda un 10 % de retenido en el tamiz de 90 µm, criterio similar al empleado a escala industrial en la obtención de Cemento Portland según la *NC 980:2013 Determinación de la finura y la superficie específica*.



Figura 2.5 a), b) y c) Proceso de producción de LC²

Finura de molienda por tamizado.

Tabla 3.1 Ensayo de granulometría del LC² molido en UCLV

	LC ² molido en UCLV	
	Tamiz de 45 μ m	Tamiz de 90 μ m
Cantidad a ensayar	25g	25g
Retenido acumulado	88.8%	37.6%
% que pasa	11.2%	62.4%

Tabla 3.1 Ensayo de granulometría del LC² molido en Fomento

	LC ² molido en Fomento	
	Tamiz de 45 μ m	Tamiz de 90 μ m
Cantidad a ensayar	25g	25g
Retenido acumulado	93.6%	58%
% que pasa	6.4%	42%

No se cumple el ensayo de granulometría, pues el retenido acumulado debe estar entre el 0% y el 10%, y ninguno de los LC², tanto el de la UCLV como el de Fomento obtiene un resultado satisfactorio.

Posteriormente a esta molienda se procede a fabricarse el cemento LC3, que consiste en la liga de un 50 % de esta adición (LC2) con el otro 50% de cemento P-35, dicha liga se llevó a cabo en la mezcladora.

2.3.2.2. Caliza

La caliza empleada posee como composición química la que se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química de la caliza

Compuesto	Por ciento %
SiO ₂	4.12
Al ₂ O ₃	1.15
Fe ₂ O ₃	0.64
CaO	51.59
MgO	1.21
SO ₃	40.92
CaCO ₃	92



Figura 2.3 Caliza

2.2.3.3 El yeso

El yeso utilizado en la investigación, presenta la siguiente caracterización química (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Composición química del Yeso

Compuesto	Porcentaje %
SiO ₂	5.24
Al ₂ O ₃	4.7
Fe ₂ O ₃	3.38
CaO	30.36
MgO	1.96
SO ₃	31.95
PPI	21.67
RI	9.07



Figura 2.4 Yeso

2.2.3.4 Arcilla

El yacimiento en cuestión se identifica como Manifestación Yaguajay, y forma parte de la secuencia arcillosa denominada como Arcillas Bamburanao (Figura 2.4) que se distribuye en la zona Norte de los municipios Remedios, Yaguajay y Chambas. Los primeros estudios que se realizaron de esta secuencia arcillosa datan de la década de 1980, específicamente entre 1985 y 1990 cuando se realiza el levantamiento geológico 1:50000 Las Villas II y búsquedas acompañantes en coordinación Cuba-Bulgaria, ellos reportaron la presencia de arcillas caoliníticas en una franja de 120 Km de largo en la porción norte de las hojas 1:25000 Remedios, Dolores, Yaguajay y Chambas. En este trabajo se realizaron 32 pozos de perforación que atravesaron todo el corte de las arcillas, indicando la presencia del

mineral Halloysita, clasificando las arcillas como caoliníticas con un contenido promedio de Al_2O_3 de 27,14%.

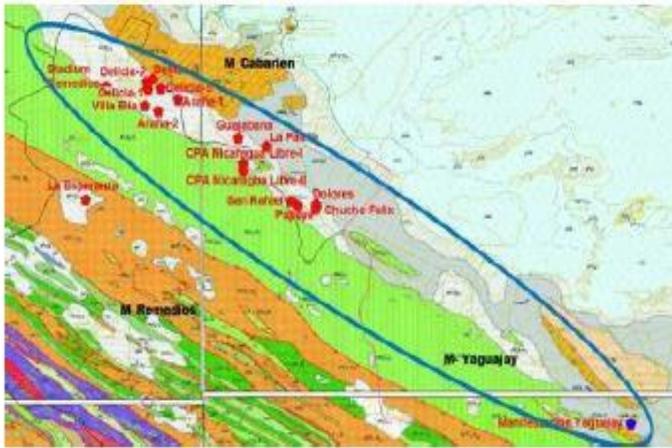


Figura 2.4: Secuencia arcillosa Arcillas Bamburanao

El relieve es del tipo ondulado a colinoso suave con diferencia de alturas en las elevaciones de los llanos con relación a las alturas propiamente dichas de 30 a 400 m, con pendientes abruptas en las alturas mayor que 30° y pendientes más suaves en las elevaciones de los llanos y presencia de carsificación en ambas. En general los suelos son fértiles del tipo ferrosialíticos de color rojizo con perdigones de hierro.

Los sedimentos pertenecen a la Plataforma Neogénico-Cuaternario, clasificados como Sedimentos Marinos Redepositados, que estuvieron en estrecha relación con las transgresiones y regresiones del nivel del mar, formando la Unidad Informal Arcillas Bamburanao, de edad Cuaternario. La geología de este sector está marcada por su ubicación en la porción norte de la región central de Cuba donde se establecieron lagunas interiores producto de las repetidas transgresiones y regresiones del mar ocasionadas por los períodos de glaciación depositando grandes volúmenes de sedimentos terrígenos, calcáreos y arcillosos en capas horizontales de espesores hasta las primeras decenas de metros, tal como se observa en la actualidad. Los sedimentos provenientes de una fuente rica en minerales aluminosilíceos formaron las Arcillas Bamburanao, en ellas se diferencian dos tipos por su coloración y composición:

a) Arcillas de color amarillento ocre a pardo hasta rojizo de oxidación, con perdigones de óxido de hierro y de Mn, de diámetro hasta 1 cm. De estratificación masiva y fragmentos aislados de silicita y calizas en toda su masa, plásticas, se disuelven fácilmente en presencia del agua.

b) Arcillas de color gris, gris verdoso y verdoso, de estructura muy fina, de estratificación incipiente y en ocasiones bien estratificadas. Presentan intercalaciones de CaCO_3 y por toda su masa cristaltos de yeso de 0,5 a 1,5 cm confirmando su origen marino. Son muy plásticas y se disuelven fácilmente en agua.

El grado de accesibilidad es satisfactorio por su cercana ubicación a Yaguajay y red vial bien desarrollada y en buen estado. Por la porción occidental del área, atraviesa la llamada Carretera Sancti Spíritus-Yaguajay y por la porción norte el denominado Circuito Norte, con dirección a Chambas. La industria minera está representada por la Cantera El Yigre perteneciente a la Industria de Materiales de la Construcción, localizada 1.5 km al sur del área.

2.2.3.4.1. La composición química de las arcillas

La composición química de las arcillas mediante análisis por FRX se muestra en la tabla 2.9. Los altos contenidos de Fe_2O_3 reportados se asocian en primer lugar a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, que se evidencia en el color pardo-rojizo de las muestras, aunque no se descarta cierto grado de sustitución isomórfica del Al por el Fe en la capa octaédrica de los minerales arcillosos. La arcilla proveniente de Yaguajay también presenta un contenido de elementos alcalino-térreos relativamente alto ($\text{CaO} + \text{MgO} = 3,68$), que puede ser un indicio probable de la presencia de calcita o minerales similares.

Tabla 2.9 Composición química de las arcillas caoliníticas

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Mn_2O_3	Otros	PPI
YG	46,58	20,06	14,41	2,94	0,74	0,04	0,11	0,06	1,12	0,13	0,73	0,14	12,74

2.3.3. Cemento P-35

El cemento utilizado fue elaborado en la fábrica de cemento Karl Marx de la provincia de Cienfuegos, de acuerdo a la NC 54 205:80 clasificado como cemento Portland P-35. En la tabla 2.1 y la tabla 2.2 se muestran las propiedades físico-mecánicas del cemento P-35 de Cienfuegos y su composición química, respectivamente.

Tabla 2.1. Propiedades físico-mecánicas del cemento P-35 de Cienfuegos.

Ensayo	Resultados
Tiempo de fraguado inicial (min)	105
Tiempo de fraguado final (h)	3,25
Finura (Retenido en el tamiz de 45-μm) (%)	23,2
Finura (Retenido en el tamiz de 90-μm) (%)	1,7
Superficie específica. (Blaine) (cm²/g)	3671
P.U. Suelto (kg/l)	1,11
Resistencia Comp. 3 días (MPa)	28,9
Resistencia Comp. 7 días (MPa)	35
Resistencia Comp. 28 días (MPa)	44,1

Fuente: Confeccionado en el laboratorio de la fábrica de cemento Carlos Marx

Tabla 2.2. Composición química del cemento P-35 de Cienfuegos.

SiO₂	21,73
Al₂O₃	5,02
Fe₂O₃	3,12
CaO	60,66
CL	1,24
CN	24,1
SO₃	3,05
PPI	2,02
R.I	2,20
MgO	1,51
Na₂O	0,41
K₂O	0,59

Fuente: Confeccionado en el laboratorio de la fábrica de cemento Carlos Marx



Figura 2.2 Cemento Portland P-35

2.3.4. La 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_2)	%	2.12	2.08	2.10	NC 54-35/86
Oxido Férrico (Fe_2O_3)	%	1.91	1.91	1.91	NC 54-339/86
Oxido de Aluminio (Al_2O_3)	%	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_3)	%	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_3)	%	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_3)	%	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

2.3.5. El 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*.

2.3.6. Aditivo Sika Plast.

Aditivo reductor de agua de rango medio de alta eficiencia y con permanencia de trabajabilidad. Libre de cloruros.

Se utiliza principalmente en la elaboración de concretos para todo tipo de estructuras, especialmente en aquellos que se requiere optimizar el contenido de cemento por metro cúbico y requieren de trabajabilidad extendida.

Aporta excelente reducción de agua sin impactar las características del concreto fresco. Permite obtener concretos con trabajabilidad extendida. Utilizado en concretos que requiere un corto fraguado. Aumenta las resistencias mecánicas. Permite acabados superficiales de alta calidad (Sika 2013).

Tipo: Aditivo líquido

Color: Café oscuro

Densidad: 1.13 kg/L

2.4 Fabricación de las mezclas de morteros

Las mezclas de morteros de albañilería fueron elaboradas en el laboratorio de la Facultad de Construcciones de la UCLV. Primeramente, se pesó cada material (fig 2.4 a), se colocó primeramente el cemento y el agua en la amasadora durante 30 segundos y después se vertieron los restantes materiales (fig 2.4 b) según las proporciones establecidas en la tabla 2.5 con el objetivo de facilitar el mezclado y garantizar la correcta homogenización de los materiales, después de mezclado y amasado se colocó la mezcla en los moldes. En la tabla 2.5 se presentan las series de morteros fabricadas.

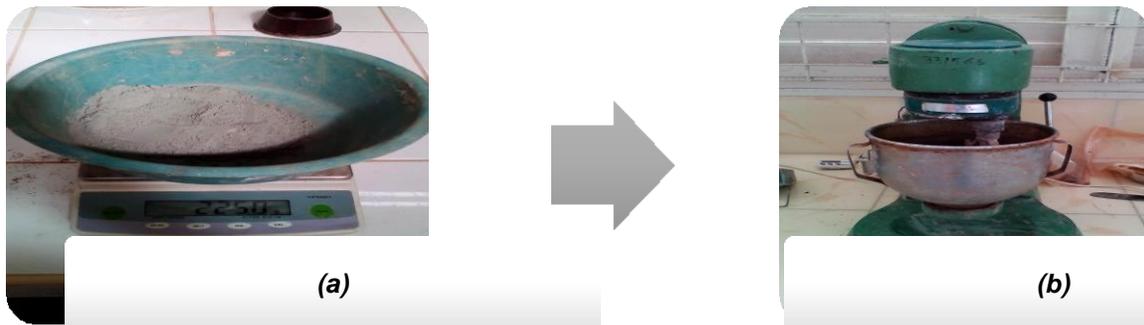


Figura 2.4: Proceso de fabricación de los morteros (a, b, cd)

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

No. de mezcla	Mortero o Tipo	Cemento	Proporciones					Cantidad de Probetas
			Adición LC2	Cemento	Arena	Cal	Plastificante	
M1	IV	P-35	0,5	0,5	4	1	0.05	12
M2	IV	P-35		1	4	1	0.05	12

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).



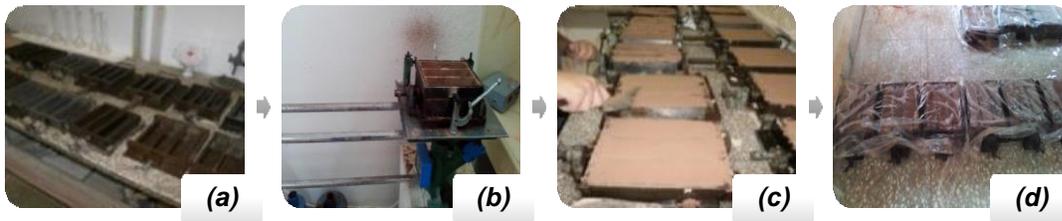
Figura 2.5: Determinación de la fluidez en la mesa de sacudidas

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 (a). Se vertió el material en los moldes en dos capas sucesivas compactando cada una con 60 golpes en la mesa de compactación (b). Cuando el mortero comenzó a endurecer, se enrasó el molde con una superficie metálica (c) y se colocaron en un ambiente con más del 60 % de humedad tapando los moldes con nailon (d). Después de 24 horas de elaboradas las probetas se desmoldaron, se marcaron y se sometieron al proceso de curado sumergiéndolas en agua (e) hasta las edades correspondientes a cada ensayo. Por cada muestra se fabricaron 4 moldes de probetas prismáticas de (40x40x160 mm) para la

realización de los ensayos programados en el diseño de experimento. Se elaboraron 24 probetas que corresponde al diseño de 2 mezclas en un total de 8 amasadas.



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 18 probetas. Para el ensayo de flexión se colocaron las probetas en una prensa Caena 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_f, es la resistencia a flexión (MPa).

R_c, es la resistencia a compresión (MPa)

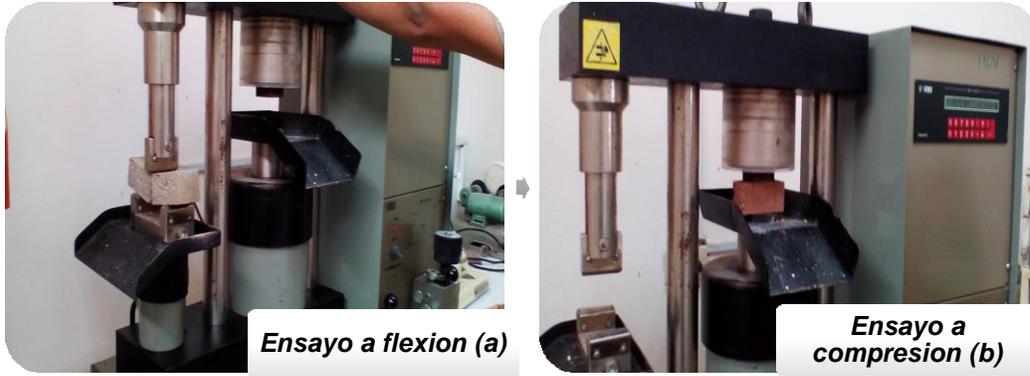


Figura 2.7: Ensayos de resistencia a la flexión y compresión (a, b).

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

Para este ensayo se colocaron en absorción 6 probetas prismáticas, 3 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.

$$A = \frac{P_{total} - P_{inicial}}{V} \quad (g/cm^3) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.3}$$

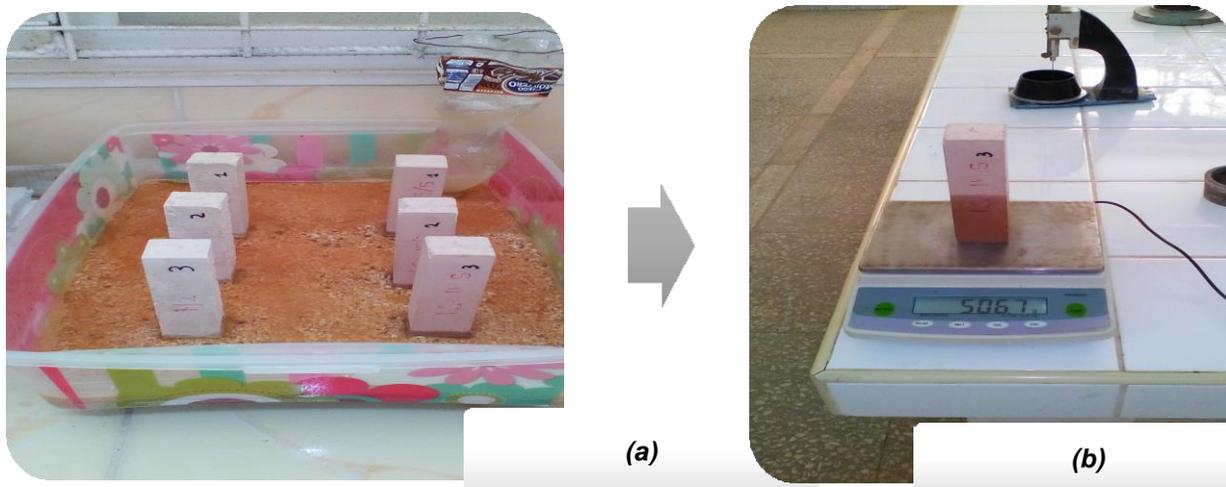


Figura 2.8: Ensayo de absorción de agua por capilaridad.

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 dos tipos de cementos (LC3 50(2:1) y (P-35) lo cual permitirá comparar y evaluar la influencia de dichos aglomerantes en las propiedades de los morteros.
2. 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 251:2013 lo que puede afectar propiedades del mortero.
3. La adición mineral LC2 no alcanzó la finura requerida, tomándose como criterio de molienda un 10 % de retenido en el tamiz de 90 μm , criterio similar al empleado a escala industrial en la obtención de Cemento Portland según la NC 980:2013 *Determinación de la finura y la superficie específica*.
4. Tanto la caracterización de las materias primas como la realización de los ensayos físico-mecánicos se hicieron teniendo en cuenta las normas cubanas establecidas para ello.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A MORTEROS DE ALBAÑILERÍA.

En este capítulo se evalúan las propiedades y características de los morteros con el uso de cemento LC3-50 (2:1) mediante la exposición y análisis de los resultados de los ensayos físico-mecánicos realizados según el diseño experimental, así como su comparación con el cemento Portland P-35 y con las normativas nacionales e internacionales vigentes. También se realizó un protocolo para la realización de ensayo de pull-out después de efectuar 30 ciclos de humedecido y secado y el ensayo de cristalización de sales.

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 ($190 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$) 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)	270	18.5
M-2	P-35	270	19

Fuente: Elaborado por el autor

En la tabla 3.1 se observa que el mortero M-1 producido con cemento LC3 50(2:1) tiene menor consistencia que el mortero M-2 producido con P-35, aunque si cumple con lo establecido en la norma NC 170:2002 la cual establece un valor de ($190 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$) de diámetro.

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 (40x40x160mm). Se presentan en la Tabla 3.2 los resultados de las resistencias medias a flexión y compresión obtenidas 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	IV (1:4:1)	LC3-50 (2:1)	0.07	0.16	0.23	2.9	5	5.77
M2		P-35	0.22	0.23	0.33	7.4	9.1	10.81

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.

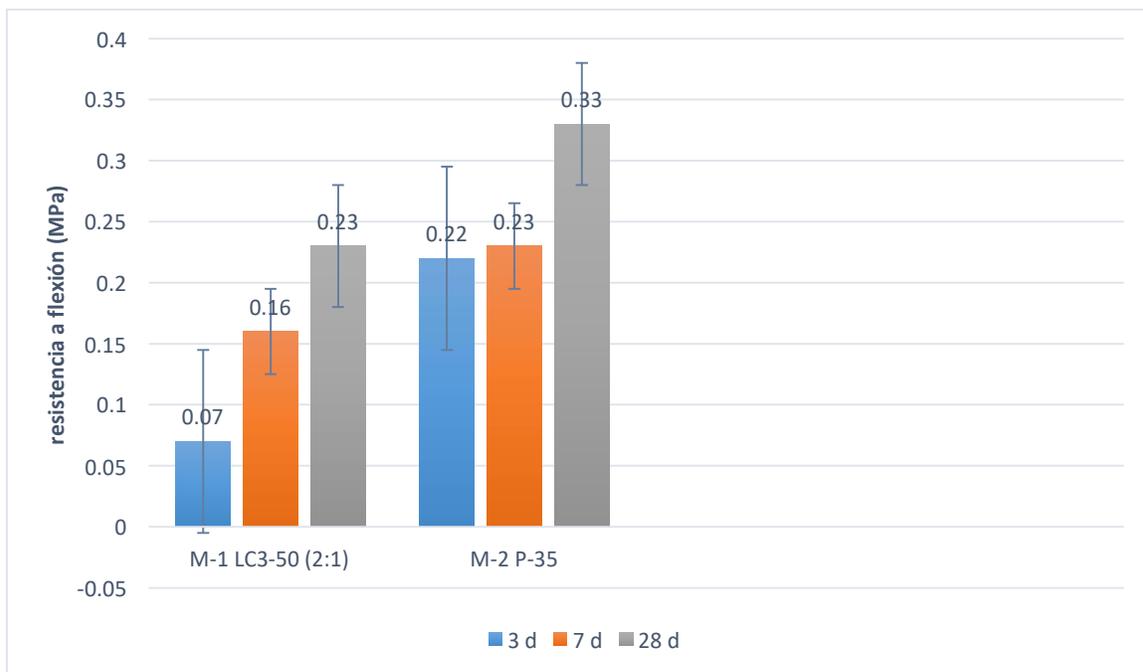


Figura 3.1: Gráfico de resistencia a flexión.

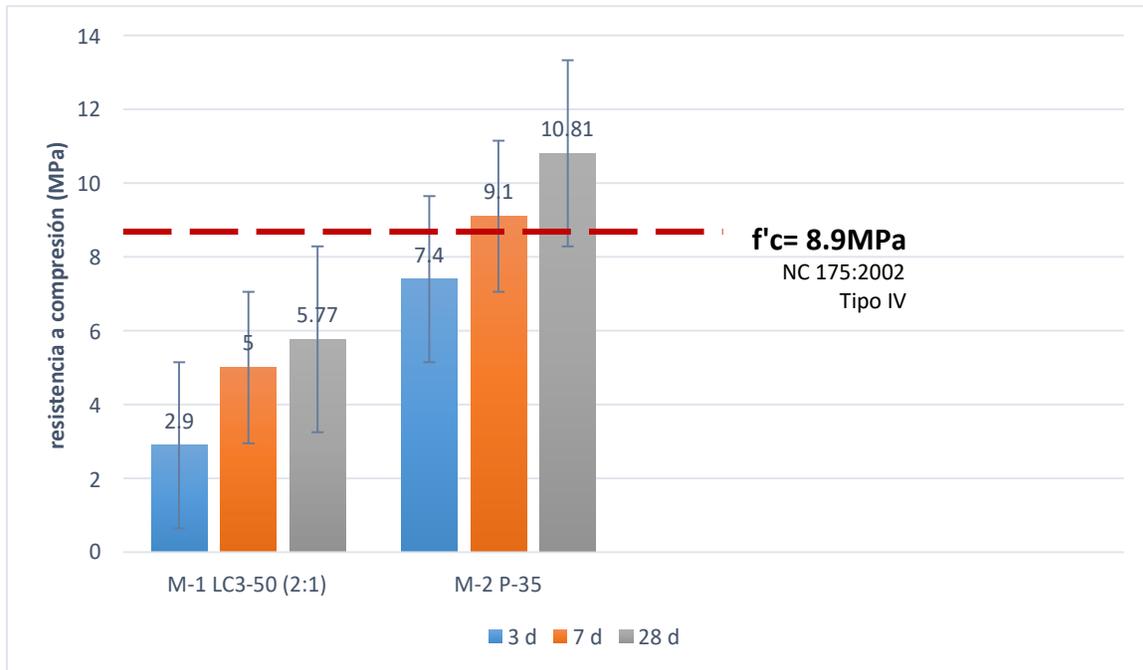


Figura 3.2: Gráfico de resistencia a compresión

Mediante el análisis de los datos obtenidos en el gráfico, se obtiene que el mortero elaborado con el cemento LC3-50(2:1), presenta resistencias inferiores respecto a la muestra patrón (P-35) y no cumple con las especificaciones establecidas por la norma cubana NC175:2002 que para los morteros (Tipo IV) la cual establece 8.9 MPa a los 28 días.

En la tabla 3.2 se puede observar que la muestra M1, no cumple por un 35.2% la resistencia establecida según la norma NC 175:2002 a los 28 días.

Sin embargo, si se compara el resultado de resistencia a compresión del mortero elaborado con LC3 50(2:1) con los valores de los morteros tipo II y tipo III para cementos de albañilería y PP-25 respectivamente, que usan la misma dosificación de cemento, arena y cal: (1:4:1) cumple con lo establecido por dicha norma.

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:ca l)	Tipo de cementos	$f'c$ (MPa) 28 días	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento P-35)	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento de albañilería)	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento PP-25)
M1	1:4:1	LC3-50 (2:1)	5.77	8.9 (tipo IV)	3.5 (tipo II)	5.2 (tipo III)

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 3 probetas prismáticas de 40x40x160cm por cada serie de mortero lo que da un total de 6 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 ²)					
		4h	8h	1d	3d	5d	7d
M1	LC3 50(2:1)	1.09	1.4	2.13	2.7	2.94	2.96
M2	P- 35	1.34	1.8	3.2	3.23	3.25	3.32

Como se evidencia en la Figura 3. 5a y Figura 3.5b los resultados de la absorción capilar para la serie M1- LC3 50(2:1) es menor que la muestra patrón M2 (P-35) obteniéndose para esta primera un valor de 2.96 g/cm². inferior en un 10.8 % a la serie M2 (P-35) para la cual se obtuvo un valor de absorción capilar a los 7 días de 3.32 g/cm²

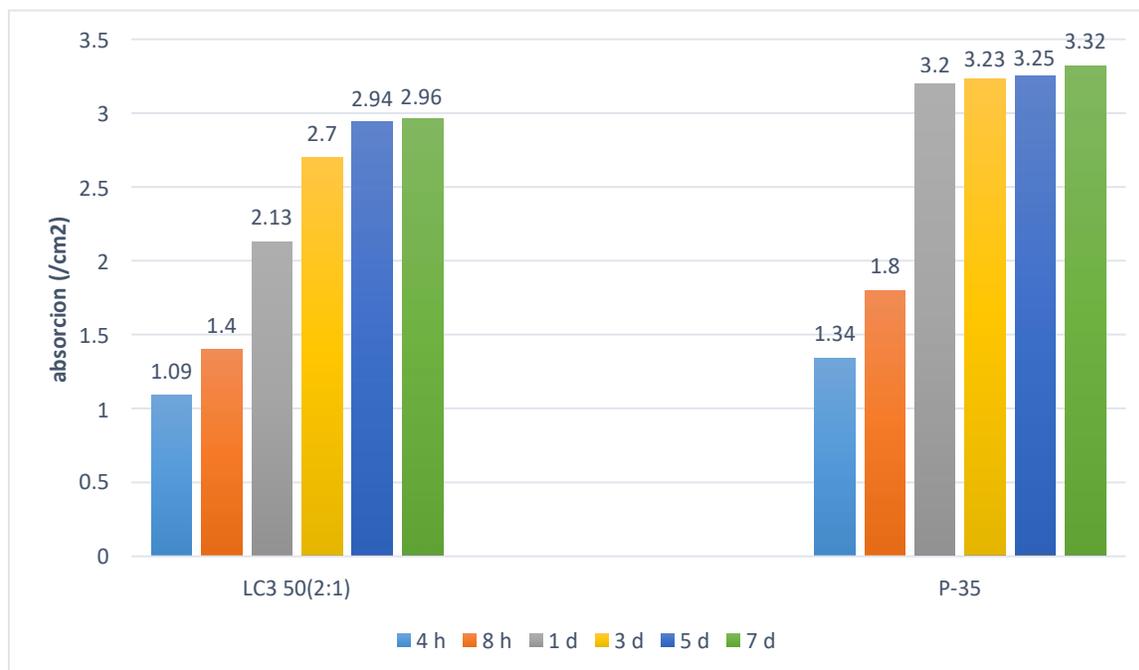


Figura 3.5a: Gráfico de absorción de agua por capilaridad.

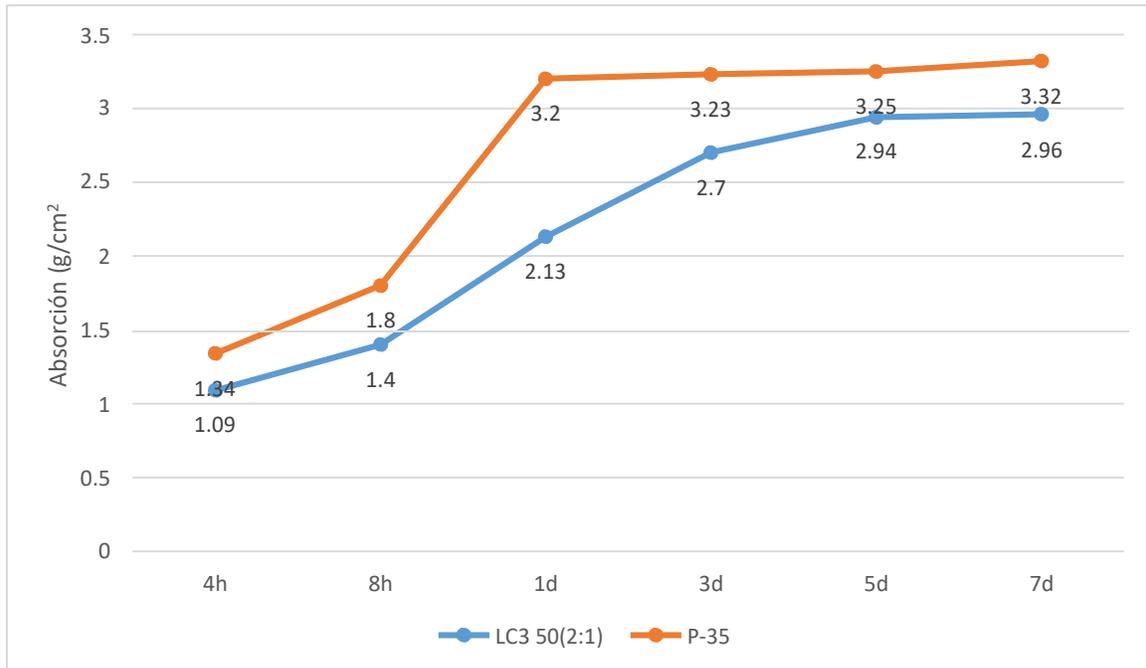


Figura 3.5b: Gráfico de absorción de agua por capilaridad.

3.4 Protocolo para la realización de los ensayos de durabilidad

1. Selección de las materias primas.
 1. Preparación de las materias primas.
 2. Caracterización de las materias primas.
 3. Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar de agua.
 4. Realización de los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar de agua a las probetas de morteros.
 5. Preparación de las muestras de morteros con sustratos de hormigón.

La fabricación de estas muestras se realizó uniendo dos tabletas de hormigón con una capa de mortero de una pulgada de espesor la cual se compacto con 25 golpes suaves y homogéneos, posteriormente se sometió a un proceso de curado de 28 días. Para cada tipo de cemento (LC3-50 (2:1) fig 2.6 a) y (P-35 fig 2.6 b) se fabricaron dos muestras una para realizar el proceso de humedecido en agua común y otra para humedecerla en agua con una disolución de 0.3 % de NaCl simulando el agua de mar.

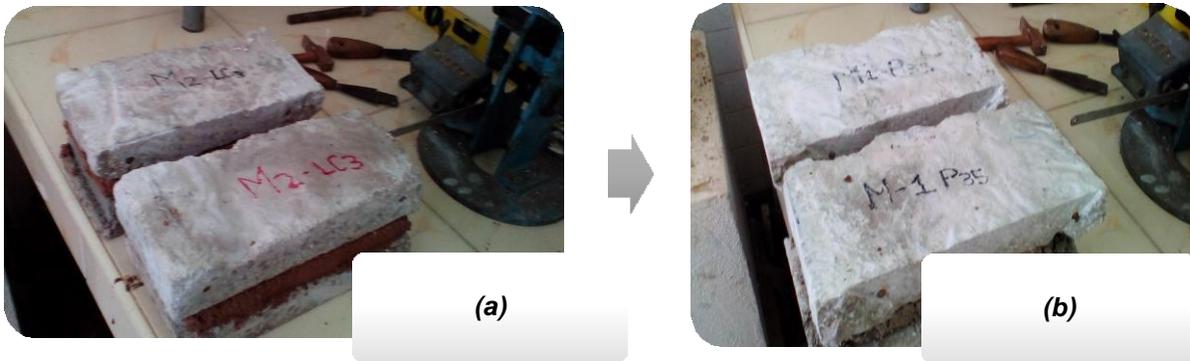


Figura 2.6: Proceso de fabricación de las muestras (a y b)

6. Extracción de los testigos
7. Realización de los ensayos de humedecimiento y secado a los testigos seleccionado. En este caso se comenzará con un proceso de 20 días, realizando 30 ciclos donde los especímenes estarán 12h sumergidos en agua, luego se secarán en la estufa a 105 grados por 3 o 4 horas y luego se introducirán en el agua nuevamente hasta completar los 30 ciclos según la norma UDC 666-97:620-11:1991.
8. Realización del ensayo de cristalización de sales. Para evaluar el deterioro causado por el ataque de sales solubles en el mortero, se realizará un ensayo de envejecimiento acelerado mediante la cristalización de sales con una disolución que contiene 0.3% de cloruro de sodio (NaCl) simulando el agua de mar siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE 7-136-58.
9. Realización del ensayo de pull-out. Se tomarán los especímenes de morteros con sustratos de hormigón tanto de LC3 como los preparados con P-35 y se le extraen dos testigos de 5cm a cada muestra. Después de haber separado los testigos se pega la chapilla de arrancamiento con resina epoxi o similar, evitando un exceso de resina que pueda unir las zonas colindantes, de tal forma que dicha placa quede centrada en el área de ensayo. Posteriormente se aplica la fuerza de tracción perpendicular al área de ensayo a través de las chapillas de arrancamiento por medio de la máquina de ensayo. La fuerza de tracción se aplica por medio de una chapilla de arrancamiento unida al área de ensayo de la superficie del mortero.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo.

1. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con LC3 50(2:1) no cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC175:2002 si son comparadas con morteros tipos IV de dicha norma.
2. Si se compara el resultado de resistencia a compresión del mortero elaborado con LC3 50(2:1) con los valores de los morteros tipo II y tipo III para cementos de albañilería y PP-25 respectivamente, que usan la misma dosificación de cemento, arena y cal: (1:4:1) cumple con lo establecido por la norma NC 175:2002.
3. La absorción capilar en los morteros elaborados con LC3 50(2:1) adquiere valores inferiores a los morteros de referencia elaborados con cemento P-35, obteniéndose resultados a los 7 días para la serie M1- LC3 50(2:1) de 2.96 g/cm² Estando por debajo de la muestra patrón (P-35) en un 10.8 % para la cual se obtuvo un valor de 3.32 g/cm²
4. Protocolo para la evaluación de la durabilidad de los morteros de albañilería.
 - Selección de las materias primas.
 - Preparación de las materias primas.
 - Caracterización de las materias primas.
 - Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos, absorción capilar de agua y fluidez
 - Realización de los ensayos físico-mecánicos, absorción capilar de agua y fluidez a las probetas de morteros.
 - Preparación de las muestras de morteros con sustratos de hormigón.
 - Extracción de los testigos
 - Realización de los ensayos de humedecimiento y secado a los testigos seleccionado.
 - Realización del ensayo de cristalización de sales.
 - Realización del ensayo Pull-Out.(Aguilar Contreras, 2015)

Conclusiones generales

1. Dentro de las principales patologías que se aprecian en los morteros están la falta de adherencia al soporte, erosiones, desprendimientos, lixiviación, fisuras, grietas, manchas, enmohecimientos, ampollas, eflorescencias, desagregaciones, depósitos superficiales entre otras.
 2. Las alteraciones en morteros se pueden dividir en alteración física (cambios térmicos, acción del agua, acción del hielo y acción del viento), alteración química (sales solubles, contaminación atmosférica y costras) y alteración biológica (bacterias, algas, líquenes, musgos, plantas inferiores y superiores, insectos, mamíferos y aves).
 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 251:2013 lo que puede afectar propiedades del mortero.
 4. La adición mineral LC2 no alcanzó la finura requerida, tomándose como criterio de molienda un 10 % de retenido en el tamiz de 90 μm , criterio similar al empleado a escala industrial en la obtención de Cemento Portland según la *NC 980:2013 Determinación de la finura y la superficie específica*. Lo cual puede afectar directamente en las propiedades de los morteros.
 5. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con LC3 50(2:1) no cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC175:2002 si son comparadas con morteros tipos IV de dicha norma sin embargo si se compara con los valores de los morteros tipo II y tipo III para cementos de albañilería y PP-25 respectivamente, que usan la misma dosificación de cemento, arena y cal: (1:4:1) cumple con lo establecido por la norma.
 6. La absorción capilar en los morteros elaborados con LC3 50(2:1) adquiere valores inferiores a los morteros de referencia elaborados con cemento P-35 obteniéndose resultados a los 7 días para la serie M1- LC3 50(2:1) se obtuvo un valor de absorción capilar de 2.96 g/cm^2 ·Estando por debajo de la muestra patrón (P-35) en un 10.8 % para la cual se obtuvo un valor de 3.32 g/cm^2
 7. Como resultado de esta investigación se propone un protocolo para la realización de los ensayos de cristalización de sales, humedecimiento y secado y pull out a las muestras elaboradas con P-35 y LC3.
- Selección de las materias primas.
 - Preparación de las materias primas.

- Caracterización de las materias primas.
- Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos, absorción capilar de agua y fluidez
- Realización de los ensayos físico-mecánicos, absorción capilar de agua y fluidez a las probetas de morteros.
- Preparación de las muestras de morteros con sustratos de hormigón.
- Extracción de los testigos
- Realización de los ensayos de humedecimiento y secado a los testigos seleccionados.
- Realización del ensayo de cristalización de sales.
 - Realización del ensayo Pull-Out

Recomendaciones

1. Emplear durante la producción de morteros de albañilería a escala de laboratorio, un árido fino que permita validar física, mecánica y químicamente el uso de los cementos LC3-60 (2:1) para la conservación de morteros históricos.
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 de sodio y lixiviación de sales), que permitan predecir el comportamiento químico del cemento LC3-50 (2:1) en morteros de albañilería, bajo condiciones similares a las que están sometidas las estructurales patrimoniales en el país.

Bibliografía

- AFAM.A. *Morteros para albañilería. Definiciones y clasificación*. [Online]. Available: <http://www.concretonline.com/morteros> de albañilería [Accessed 4 de abril 2018].
- AFAM.C 2018. Ciencias Experimentales y Patrimonio Cultural. *Instituto Andaluz del patrimonio histórico*.
- AGUILAR CONTRERAS, Y. 2015. *Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- AGUILAR, R. 2007. Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad. *Universidad Austral de Chile. Facultad de ingeniería. Escuela ingeniería civil en obras civiles*.
- ALVAREZ IBARRA, C. 2014. *"Evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería con CBC"*. Tesis de Diploma, UCLV.
- ÁLVAREZ, J. J. L. & ÁLVAREZ, M. A. 2010. La cerámica aplicada en arquitectura: hacia una normalización de los criterios de intervención. *Ge-conservación*, 99-126.
- ÁLVAREZ, J. L. 2011. *MORTEROS DE ALBANILERIA, Antecedentes, clasificación, materiales, métodos de ensayos y tablas de resultados.*, La Habana, Cuba.
- ANDRES, I. & BRAVO, C. 2016. *Evaluación de las propiedades físico mecánicas en morteros de restauración a partir de cementos de bajo carbono producidos localmente*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
- ANTONI, M. 2013. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone.
- ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTIRENA, F. & SCRIVENER, K. 2012. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42, 1579-1589.
- 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.
- B, A. *"Morteros de albañilería"* [Online]. [Online]. Available: <http://www.construmatica.com/construpedia/Morteros> [Accessed 15/52018].
- 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.
- 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.
- 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*.
- CORROTO, M., SABADOR, E., MEDINA, C., FRFAS, M. & SANCHEZ-DE ROJAS, M. 2012. Mortar rendering repair. New AENOR standard documents. *Informes de la Construcción*, 64, 141-151.

- DÉTRIE, J. P. & JARRAULT, P. 1969. *La pollution atmosphérique*, Dunod Paris.
- FERNANDEZ LOPEZ, R. 2009. Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries.
- FORT, R. & PÉREZ-MONSERRAT, E. 2012. La Conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. *Programa Geomateriales, Instituto de Geociencias (CSIC-UCM)*.
- GAVILÁN, S. E., DO VALE SILVA, B., DA SILVA FILHO, L. C. P. & BARBOZA, M. P. Utilización del ensayo APULOT en la determinación de la resistencia "in situ" del hormigón.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Y. 2015. *Evaluación de la influencia de cementos con sustituciones de clínquer al 60% y 70% por una mezcla de arcilla calcinada y caliza en morteros de albañilería*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- HERNBOSTEL, C. 2002. *"Materiales para construcción, tipos, usos y aplicaciones."*, México: Limusa.
- LANA, M. J. 2005. El mercado CE en los morteros de albañilería.
- MARÍA, A. 2014. *Establecimiento de criterios de compatibilidad de materiales de reparación basados en ensayos acelerados de durabilidad in-situ*.
- MARTIRENA, J. 2004. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. *Universidad Central Marta Abreu de las Villas*.
- 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. *València: Universitat Politècnica de València*.
- MORANTE PORTOCARRERO, Á. A. 2011. Mejora de la adherencia mortero-ladrillo de concreto.
- N.A 2007. Tema 4: Morteros de Construcción y Ornamentación.
- 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
- PERAZA ABREU, L. 2014. *"Aplicación del protocolo STADIUM® a hormigones producidos con cemento de bajo contenido de carbono (LCC)"*. UCLV.
- PÉREZ CABRERA, F. 2013. Cuba, pionera en la producción de cemento ecológico. Granma.
- 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.
- PRADO, R. H., CERECEDA, M. L., SPAIRANI BERRIO, Y. & TORTOSA, J. A. H. 2009. Estudio y caracterización de morteros para la restauración arquitectónica. Alicante.
- RIERA JUAN, S. & GONÇALVES SOARES, M. A. 2010. Análisis comparativo experimental de algunos morteros de restauración.
- RODRIGUEZ, O. 2003. Morteros Guía General. *Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero. Madrid. España S.A.*
- RUIZ-AGUDO, E. 2007. Prevención del dano debido a la cristalización de sales en el patrimonio histórico construido mediante el uso de inhibidores de la cristalización.
- SALAZAR, A. 2000. *"Guía práctica. Morteros de pega para muros de mampostería"*.
- SÁNCHEZ, F. J. A. 2002. "Historia, caracterización y restauración de morteros." *In: PEDRO CID. S.A.*

- 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. *Temas aplicados a los materiales de construcción. Ciudad de La Habana.*
- TORRENS, R. Y. G. F. 1995. Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle. Zürich.: Office Fédéral des Routes.
- VIZCAÍNO, L. 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza*. Tesis Doctoral, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
- WINKLER, E. M. 1971. Decay of stone. *Studies in Conservation*, 16, 1-14.