

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento: Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título Propuesta de un protocolo de investigación para la realización de ensayos de durabilidad a morteros de albañilería.

Autores Roberto Javier Toboso Santana.

**Tutores Dr. Arq. Dania Betancourt Cura.
Dr. Cs. J. Fernando Martirena.**

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

La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.

Isaac Asimov

Es mi deseo como el más sencillo gesto de agradecimiento, dedicarles mi trabajo:

- A mi madre, porque ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.
- A mis abuelos por siempre estar junto a mí, bríndame todo de sí y ser un apoyo en mi vida.

Ante todo doy gracias:

- A mi tutora y consultantes que me guiaron con paciencia, conocimientos y dedicación.
- A mis vecinas Esmera, Leonor y Zelmy por contar siempre con su ayuda y confiar en que seré un gran profesional.
- A los trabajadores del taller de construcciones “El Patio” de Manicaragua, que aportaron algunos materiales para la realización de este trabajo.
- A los técnicos del laboratorio Yoel y Felipe, por estar dispuestos a prestar su ayuda en todo momento.
- A los trabajadores de la fábrica de cemento de Siguaney.
- A mis compañeros de vida en estos cinco años, por compartir conmigo sus alegrías y tristezas, por tantos días de sacrificio y esfuerzos constantes que junto conmigo vivieron para el alcance y culminación de esta gran etapa.
- Al resto de mi familia, que de una manera u otra me han ayudado siempre que lo he necesitado.
- En fin a todos los que facilitaron la realización de este trabajo.

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, está 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.

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.

Indice	
<i>Introducción</i>	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO	6
1.1. Morteros. Generalidades.	6
1.1.1. Clasificación de los morteros de albañilería.....	6
1.1.2. Dosificaciones de los morteros de albañilería.	8
1.1.3. Propiedades de los morteros de albañilería.	9
1.1.4. Normas de especificaciones de calidad y ensayos a morteros.	13
1.2. Morteros. Comportamiento de la durabilidad.....	14
1.2.1. Ensayos de durabilidad a morteros.....	15
1.3. Cemento de bajo contenido de carbono (LC ³).	19
1.3.1. Cementos ternarios con arcillas calcinadas.	20
1.3.2. Propiedades del cemento LC ³	20
1.3.3. Aplicaciones e importancia del cemento LC3.	21
1.3.4. Antecedentes del empleo de cemento LC ³ en morteros de albañilería.	21
1.4. Generalidades fundamentales del LC2.	23
1.4.1. Puzolanas. Definición.	23
1.4.2. Clasificación de las puzolanas.	23
1.4.3. Los cementos puzolánicos.....	24
1.4.4. Propiedades de los cementos puzolánicos.	24
1.5. Conclusiones parciales del capítulo	25
CAPÍTULO II. EMPLEO DEL CEMENTO LC3-50 EN MORTEROS DE ALBAÑILERÍA.	27
2.1 Generalidades	27
2.2 Diseño Experimental	27
2.3 Obtención y caracterización de las materias primas.	28
2.3.1 Árido	29
2.3.2 Cemento P-35.....	30
2.3.3 Cal.....	31
2.3.4 Agua.....	32
2.3.5 Aditivo Sika Plast.	32
2.3.6 Caliza.	32

2.3.7	Yeso.....	32
2.3.8	Arcilla.....	33
2.4	Producción de la adición LC2.....	35
2.5	Fabricación de las mezclas de morteros.....	37
2.5.1	Ensayo de consistencia. NC 170:2002.....	37
2.5.2	Proceso de fabricación de las probetas. NC 173:2002.....	38
2.6	Ensayos físico-mecánicos a probetas de morteros. Procedimientos.....	39
2.6.1	Resistencia a flexión y compresión. (NC173, 2002).....	39
2.6.2	Absorción de agua por capilaridad. (NC171, 2002).....	40
2.7	Conclusiones del capítulo.....	41
<i>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A MORTEROS DE ALBAÑILERÍA.....</i>		<i>42</i>
3.1	<i>Análisis de resultados de la consistencia de los morteros.....</i>	<i>42</i>
3.2	<i>Análisis de resultados de la resistencia mecánica de los morteros.....</i>	<i>42</i>
3.3	<i>Análisis de los resultados de la absorción de agua por capilaridad en los morteros.....</i>	<i>45</i>
3.4	<i>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.....</i>	<i>46</i>
3.5	<i>Conclusiones parciales del capítulo.....</i>	<i>48</i>
<i>Conclusiones Generales:.....</i>		<i>50</i>
<i>Recomendaciones:.....</i>		<i>51</i>
<i>Bibliografía.....</i>		<i>52</i>

Introducción

El patrimonio arquitectónico se halla desprotegido frente a una modernidad que amenaza con borrar las huellas del pasado y dejar su sello, a costa de la desaparición de una identidad construida a lo largo de los siglos. (Orduña, Mondragón et al. 2014)

La degradación del mismo constituye un tema de actualidad e interés para la comunidad científica en todas las latitudes ya que la mayoría de estas edificaciones se encuentran en estado crítico de deterioro. Esto se debe principalmente a que los materiales de construcción, desde los empleados en las antiquísimas edificaciones hasta los empleados en construcciones más recientes, están expuestos a condiciones ambientales, climáticas y sociales que atentan contra su integridad y permanencia.(María 2014)

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 2013)

Los trabajos de mantenimiento y restauración de edificaciones antiguas implican, como primera actuación directa, el conocimiento de lo que se va a reparar, teniendo en consideración sus alteraciones, el origen de las mismas, la naturaleza del mortero y del soporte, así como la compatibilidad entre ambos; pasando de la aplicación de técnicas constructivas tradicionales al empleo de materiales compatibles y similares a los originales (Reira Juan 2010). La conservación o la intervención puntual o parcial en morteros antiguos, debe ser siempre la primera opción y no la remoción o

sustitución total. Cuando sean necesarias reparaciones y/o sustituciones parciales o totales de morteros, no es necesario que los materiales de sustitución sean idénticos a los antiguos. Ser compatibles significa conciliar propiedades físicas, químicas y estéticas sin necesariamente ser idéntico. Los materiales empleados deben presentar características compatibles con los materiales del sustrato, con los que estarán en contacto. (Kanan and Magadán 2009)

La compatibilidad química y mineralógica entre mortero de reparación-sustrato no es suficiente para garantizar una aceptable durabilidad del sistema. Las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa, así como la presencia de elementos contaminantes o aerosoles provenientes del medio circundante, juegan un papel fundamental. (María 2014)

En su mayoría las nuevas soluciones desarrolladas consisten en sustituir los morteros de revestimiento empleando nuevos materiales constituyentes. Esto tiene sentido, siempre que el mortero sea la piel que proteja el muro mediante la prevención de la penetración de iones y sustancias nocivas. No obstante, el tipo de aglomerante usado en las mezclas de mortero colocadas, influenciará en las reacciones que tienen lugar en la interfase mortero de reparación-sustrato y en las interacciones del sistema formado por ambos. (R. 2014)

En el contexto cubano existen varias experiencias acerca de buenos materiales potencialmente aplicables, con enfoque diferente de los desarrollados en edificios históricos de Europa los que han concluido con malas prestaciones o pobre durabilidad. Soluciones de reparación pueden ser desarrolladas basadas en el conocimiento de las causas de degradación de las edificaciones. La falta de compatibilidad entre el conocimiento del daño y los materiales elegidos pueden conducir a indeseables efectos. (R. 2014)

Con el propósito de buscar nuevas alternativas de materiales cementicios aplicables en el país, en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), desde el 2009 se realizan investigaciones sobre cementos con elevados porcentajes de sustitución de clínquer por arcillas calcinadas y caliza. Basado los tipos de daños evaluados, se desarrollarán especiales formulaciones de morteros para la reparación con empleo de materiales localmente disponibles y costeables; los

cuales se están estudiando para la formulación de morteros de albañilería desde el 2013 para el establecimiento de nuevos criterios de compatibilidad del sistema mortero de reparación-sustrato.

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 aglomerantes.

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 emplearán 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 ladrillos 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 LC3y P-35.

Novedad Científica: Se elabora un protocolo de morteros con sustratos de ladrillos 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 cementos 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 las norma NC175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones*. Preparación de los especímenes para realizar posteriormente el ensayo de humedecimiento y secado pull out y cristalización de sales.

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

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. Morteros. Generalidades.

El mortero es un material de construcción formado básicamente por una mezcla de conglomerante y árido fino que al adicionarle agua reacciona y adquiere resistencia. Puede estar compuesto además por aditivos químicos y adiciones que mejoran sus propiedades y le otorgan características especiales tanto en estado fresco como endurecido.(Barrera 2002b)

El desempeño fundamental de los morteros radica en el mejoramiento de retención de agua, adherencia, extensibilidad y demás propiedades que se ven afectadas cuando se pone en contacto con sustratos porosos y absorbentes, siendo así la resistencia a la compresión uno entre varios factores importantes. (Aguado, 1990) (Barrera 2002b).

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.(Hernbostel 2002)

1.1.1. Clasificación de los morteros de albañilería.

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.

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM), se pueden clasificar por concepto o demanda en:

Mortero diseñado: Su concepción y método de fabricación son elegidos por el fabricante para obtener propiedades específicas establecidas previamente (concepto de comportamiento).(AFAM) (s.f.-b)

Mortero prescrito: Es fabricado a partir de los componentes primarios en proporciones predeterminadas, cuyas propiedades dependen de las propiedades de los componentes (concepto de receta).(AFAM)(s.f.-b)

Según Blanco (2012), se pueden clasificar por la naturaleza del conglomerante en:

Morteros de base cal: 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 (NC 556:2007).

La cal aérea hidratada (apagada) amasada con agua y expuesta a la acción del aire, primeramente fragua por cristalización del hidróxido de calcio, se carbonata lentamente por la acción del CO₂ atmosférico, formando carbonato de calcio, poco soluble en agua. El grado de carbonatación de la cal apagada de los morteros, depende, además de las condiciones atmosféricas, fundamentalmente de la humedad y las condiciones en obra (CEMCO, 2007).

La cal hidráulica amasada con agua forma una pasta que fragua y endurece a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación dando lugar a la formación de silicatos cálcicos hidratados haciendo más recomendable su uso en ambientes húmedos.

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 Cabrera 2013)

Morteros de base cal con puzolanas: Son morteros plásticos, laborables, de porosidad media y resistencias mecánicas de baja a media. El tipo de cal y principalmente el tipo, fineza 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 (silicatos y aluminatos cálcicos hidratados), similares a los formados en la hidratación del CPO (Arriola 2009)

Morteros de base yeso: Sus propiedades están limitadas por el rápido proceso de endurecimiento expansivo y por ser el yeso un material ligeramente soluble en agua, razón por la que no debe emplearse en lugares expuestos a la acción de la misma; una vez que el yeso fraguado absorbe agua a través de su red capilar experimenta

una rápida pérdida de resistencia. En ocasiones se emplean sustancias impermeabilizantes aplicadas por impregnación o se mezclan con el yeso seco o agua de amasado para atenuar la rápida pérdida de resistencia que experimenta el yeso fraguado al absorber agua a través de su red capilar (Mas i Barrerà 2006)

Morteros basados en ligantes hidráulicos: Se definen 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 (Arriola 2009)

Morteros basados en ligantes orgánicos: Las matrices orgánicas, clasificadas en termoestables y termoplásticas, son compuestos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos de base. Dentro del campo de la restauración de morteros, las matrices termoestables/termoplásticas más empleadas son las acrílicas, poliéster y epoxi que le atribuyen a los morteros elevada reversibilidad, elasticidad y resistencia ante sustancias químicas (UNE EN 998-3:2006; Miravete, et al., 2000).

1.1.2. Dosificaciones de los morteros de albañilería.

El término dosificación define la proporción en volumen o en masa de los diferentes materiales que componen el mortero (aglomerante/árido/aditivo) y, va a depender de la finalidad del mortero, de su composición y de la resistencia mínima deseada (Renison 2000).

En el país quedan establecidas las dosificaciones de morteros de albañilería según la NC 175:2002, tal y como se presenta en la Tabla A1.1, atendiendo a la resistencia mínima requerida y adherencia a 28 días de edad en curado, que deben poseer dichos morteros y según el uso de estos: exteriores, interiores, etc. Además en la norma americana ASTM C 270-00 se establecen dosificaciones teniendo en cuenta el tipo de mortero que se quiere elaborar, plantea así tres tipos: mortero de cemento/cal/arena, mortero de cemento/arena y mortero con cemento de albañilería.

Tabla A1.1 Dosificaciones generales y propiedades de los morteros de albañilería.

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

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

1.1.3. Propiedades de los morteros de albañilería.

El mortero debe cumplir propiedades específicas en dependencia del uso asignado; para lograrlas, el cemento como materia prima fundamental juega un papel esencial, de ahí la necesidad de tener presente las funciones del mortero, para la creación de cementos de albañilería capaces de afianzar dichas propiedades. El mortero es un material similar a una piedra artificial y por consiguiente sus propiedades deben ser las de esta; pero durante el período de elaboración en obras, es una masa plástica necesariamente adaptable al lugar donde se coloca; el mortero debe estar dotado de propiedades tales que produzcan 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: estado fresco y estado endurecido (Salazar Jaramillo 2000), (Sánchez 2002).

1.1.3.1. Propiedades en estado fresco.

Esta etapa corresponde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía en correspondencia con el tiempo de fraguado, así como con las condiciones ambientales. Durante la misma el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra; superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse. En su estado fresco el mortero presenta una serie de propiedades que regulan su comportamiento y son de importancia e incidencia en las propiedades y características en su estado endurecido (Barrera 2002a)

Laborabilidad: Es la propiedad más importante del mortero fresco dada por el resultado de la lubricación de las partículas de áridos, mediante la pasta conglomerante. 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 cuanto a su relación con otras propiedades, en especial con la adherencia, es importante señalar que esta aumenta cuando el escurrimiento inicial del mortero crece, debido principalmente a un aumento de la extensión de la adherencia. Entonces una buena laborabilidad es importante para propiciar la máxima adherencia en las unidades de albañilería (Sequeira Ribeaux)

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.

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 2002b), (Sequeira Ribeaux),

Tiempo de utilización: Es el tiempo durante el cual el mortero tiene suficiente laborabilidad para ser manipulado sin necesidad de adición de agua (NC 175:2002).

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. (NC 175:2002).

1.1.3.2. 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 (AFAM) s,f,b.

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: la retracción plástica, la retracción hidráulica y la retracción térmica.

Adherencia: 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 (Morante Portocarrero 2008), (Arriola 2009)

Según Morante (2008), existen dos tipos la adherencia física y la química.

Resistencia a compresión: El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento resistente compartiendo las sollicitaciones del sistema del que forma parte. La resistencia a compresión del mortero depende en gran parte del tipo y cantidad de material cementante y de la relación agua/cemento utilizada; aumenta con un incremento del contenido de cemento y disminuye con un aumento de la inclusión de aire y del contenido de cal o de agua (Menéndez 1946)

Durabilidad: Se refiere a la capacidad que tiene el mortero de mantener sus características originales en el tiempo, principalmente frente a la acción de fenómenos físicos y químicos. En la albañilería, la durabilidad se relaciona con unidades dimensionalmente estables, sin reemplado del mortero, sin exceso de arena en la mezcla y empleando unidades de albañilería de baja absorción, lo que permite conseguir una permanente y completa adherencia y, por consiguiente, estructuras estables e impermeables (NC 175:2002; Sequeira, s.f.; Blanco, 2012).

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, et al., 2002a).

Absorción de agua: Su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad del mortero, de forma tal que si el mortero es permeable al agua, se transmite esta hacia su interior originando la aparición de humedades por filtración. Además, con la succión del agua exterior se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para la durabilidad del conjunto constructivo. Esta propiedad depende de la estructura capilar del material, por cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y menor absorción presentará (AFAM, s.f.-a).

1.1.4. 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. 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).

1.2.1. Ensayos de durabilidad a morteros.

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 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 38 mm.

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 lixivia; 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) (Vidaud 2003)

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 Cabrera 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.

Ensayo de Pull Out: Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la extracción por deslizamiento (Pull-out) del concreto endurecido, mediante la medición de la fuerza requerida para sacar un dispositivo de metal embebido en concreto junto con el fragmento de concreto de un espécimen de ensayo o una estructura. El dispositivo puede ser fundido dentro del concreto fresco o instalado en concreto endurecido.

Consiste en colocar un dispositivo de metal dentro del concreto fresco o se instala en concreto endurecido. Cuando se desea conocer una medida de la resistencia a la extracción por deslizamiento en sitio, el dispositivo se tira por medio de un pistón hidráulico el cual está apoyado en un anillo de reacción. La resistencia de extracción por deslizamiento se determina midiendo la fuerza máxima requerida para extraer el dispositivo de la masa de concreto. Alternativamente, se aplica una carga específica al dispositivo para verificar que en obra se alcance el nivel mínimo de resistencia a la extracción por deslizamiento. La metodología empleada sigue los pasos que indica la NC 172: 2002.

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 (Reira y Gonçalves, 2010; Porta, s.f.; Álvarez, 2011).

Ensayo de Permeabilidad: Como el ensayo de permeabilidad no se emplea regularmente en la caracterización de los morteros, además de mencionarse en la bibliografía de referencia, se incluye sus características más generales. Para determinar la permeabilidad en los morteros se emplea el método RILEM“Absorción de agua en probetas sometidas a baja presión de agua” (Rilem, 1980). Este método es empleado también en el CSTB (CSTB, 1993) y el CSTC (CSTC, 1982).

Este método puede ser aplicado tanto en el laboratorio como en el lugar (*in situ*) y sirve para las siguientes caracterizaciones: - Identificar el material y, por comparación, apreciar modificaciones o alteraciones superficiales que modifican la absorción de agua sobre el nivel superficial.

- Determinar el efecto sobre el procedimiento de impregnación de un tratamiento cambiando la permeabilidad superficial (impermeabilización).
- Especificar el efecto de la intemperie (pátina, poros).
- Apreciar el efecto del tiempo natural o artificial (aparato simulador) por una impermeabilidad o tratamiento impermeable o por tratamiento de impregnación.

El equipo consiste en un tubo graduado de 1 a 4 cm³ y en la parte inferior un cilindro de 2,5 cm de diámetro por 2,4 cm de alto. La altura total desde el cero del tubo graduado hasta la base es de 11 cm, lo que se corresponde con una presión de 961,38 Pa. Esta presión corresponde con una presión dinámica del viento de 39,6 m/s o 142,6 km/hr. Las mediciones se realizan a los 5, 10, 15 y en ocasiones hasta a los 30 minutos.

Es importante ir adicionando agua regularmente al tubo para que no haya una reducción de la presión.

Cámara de envejecimiento acelerado, ASTM G 53: 96 (1997).

La cámara de envejecimiento acelerado es un equipo cerrado que en su interior posee esencialmente varias lámparas de radiación ultravioleta y dispositivos de rociado de agua. El objetivo de someter a las muestras de morteros a ciclos de

radiación-rociado de agua es para simular el deterioro causado por el sol y la lluvia, o sea, a las condiciones normales de exposición en las construcciones.

El ensayo se realiza sobre 3 probetas de morteros por dosificación, las cuales son sometidas a 42 ciclos de 12 horas, con un total de 504 horas. Cada ciclo consiste en 8 horas de radiación ultravioleta a 60° C y 4 horas de rociado de agua a 45o C.

Cámara de niebla salina, UNI 5890:66.

La cámara de niebla salina es un equipo que regula la presión y la temperatura de trabajo y posee un dispositivo para la aplicación de un rociado con una solución salina sobre las probetas de morteros.

Este ensayo se realiza sobre 3 probetas de morteros por dosificación, las cuales son sometidas a 30 ciclos de 24 horas, con un total de 720 horas. Cada ciclo consiste en el rociado sobre las probetas de una solución salina de cloruro de sodio al 5%, manteniendo 0,5 atmósferas de presión y temperatura de 30° C durante 7 horas y 17 horas en ambiente de laboratorio.

1.3. Cemento de bajo contenido de carbono (LC³).

El cemento de bajo contenido de carbono (LC³) es una nueva tecnología surgida en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) que tiene la tarea de hacer frente a la creciente demanda de los recursos y al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental, utilizando la infraestructura existente disponible. Este nuevo conglomerante es un cemento ternario, y en su producción se reduce considerablemente las emisiones de CO₂ (hasta 50%) y al mismo tiempo muestra propiedades similares al cemento Portland.

Esto se logra mediante la sustitución de parte del clínquer por una combinación sinérgica de arcilla calcinada y piedra caliza, esta calcinación ocurre a temperaturas más bajas que la requerida para la obtención del clínquer lo que conlleva a ahorros de combustible. La novedad y el potencial del LC³ residen en el efecto sinérgico de arcillas calcinadas y piedra caliza en términos de resistencia a las proporciones de mezcla específicas. (Mena, 2013), (Scrivener and Kirkpatrick, 2008), (Martirena Hernández 2003, Fernández López 2009, Alujas Díaz 2010, Castillo Lara 2010, Pérez Cabrera 2013))

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

1.3.1. Cementos ternarios con arcillas calcinadas.

Los sistemas ternarios a base de cemento, cal y puzolanas se basan en la suposición que a mayor sustitución de cemento Portland, disminuye la cantidad de iones Ca²⁺ que se encuentran en la solución de agua de los poros, producida por la hidratación del cemento Portland, reduciendo la posibilidad que tenga lugar la reacción puzolánica (Martirena Hernández, Antoni et al. 2011)

Actualmente se están desarrollando estudios sobre sistemas ternarios a base de cemento Portland–arcillas calcinadas (metacaolín)-caliza. Este material cementante suplementario es un aluminosilicato activado térmicamente a temperaturas con rango entre los 500°C y 900°C (metacaolín). Ha sido demostrado en estudios recientes que el metacaolín puede sustituir cemento en una proporción de hasta un 30%. Su empleo mejora la resistencia y la durabilidad del hormigón significativamente e incrementa la superficie específica de los cementos, logrando una baja porosidad y un aumento considerable de la resistencia mecánica ((Mathieu, 2013), (Martirena, 2011)).

1.3.2. Propiedades del cemento LC³.

El potencial, la eficiencia y la sostenibilidad del LC³ se encuentran aún en estudio, registrándose resultados exitosos para la resistencia a la compresión y la absorción de agua en las producciones de bloques, baldosas y hormigones no estructurales (Fernández López 2009). Ensayos realizados por (Aguilar, 2015) con la utilización de cementos LC³ producido artesanalmente en la fabricación de bloques huecos de hormigón muestra un excelente potencial por la adecuada resistencia a compresión y la absorción alcanzada, constituyendo así una viable alternativa para nuestro país. Contribuye además en la mitigación de la contaminación ambiental con la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con el cemento Portland. Su potencial se evidencia en el efecto sinérgico entre la arcilla calcinada y la caliza que permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland dando lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos) (Castillo, 2010)

Los hormigones elaborados con LC³ de producción local requieren de mayor cantidad de agua y/o aditivo superplastificantes para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad en comparación con los hormigones producidos con cemento Portland P-35 debido a la gran cantidad de arcilla existente en sus composiciones, que es finamente molida por su baja dureza, logrando que estos cementos posean una mayor superficie específica y mayor demanda de agua (Aguilar, 2015), (Martirena, 2015).

1.3.3. Aplicaciones e importancia del cemento LC3.

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

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

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

En el trabajo de diploma de (Álvarez 2014) se empleó en morteros de albañilería, el cemento SIG B-45 producido a escala industrial en la Fábrica de Cemento de Siguaney con un 45 % de sustitución de clínquer por metacaolín y caliza (2:1). Los valores de resistencia a compresión de los morteros tipo II y III según la NC175, 2002, mostraron un sobrecumplimiento en un 50% de las especificaciones establecidas en dicha norma. En 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 el 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.

En el trabajo de (Aguilar, 2015) se utilizó el cemento LC³ -50(1,5:1) empleando como adición puzolánica, rasillas de barro calcinadas y gravilla, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa. Obteniendo una finura de molienda de 91.5% pasado por el tamiz de 90 μm y la resistencia a compresión de los bloques huecos de hormigón tipo III cumplió con las resistencias mínimas a los 7 y 28 días y con el porcentaje de absorción máximo especificado en la (NC247, 2010).

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

En el trabajo de (Lorenzo 2017) se presentó la evaluación de la influencia de la adición puzolánica LC2 en el comportamiento de morteros de albañilería tipo II, para ello se realizaron una serie de ensayos físico-mecánicos y de durabilidad de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC 175:2002 y se valoró el comportamiento que puede tener la adición LC2 en los morteros de albañilería, analizando factores como volumen de cemento, cal y adición a utilizar.

1.4. Generalidades fundamentales del LC2.

Con el propósito de sustituir gran porcentaje de cemento en las mezclas de hormigones y morteros, se ha venido realizando el estudio de una nueva adición mineral, LC2, que no es más que la combinación de arcilla calcinada + caliza + yeso, presentándose este último en pequeñas cantidades, con el fin de disminuir los aluminatos, con una distribución 70-30% (70% de cemento y 30% de arcilla calcinada).

1.4.1. Puzolanas. Definición.

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

1.4.2. Clasificación de las puzolanas.

Las puzolanas pueden clasificarse, en dependencia de su origen, en naturales o artificiales. Las puzolanas naturales son las rocas existentes en la naturaleza que no precisan para su empleo nada más que la molienda, siendo característico de ellas que en su composición química predomine la sílice, el aluminio y el hierro. Las mismas no están distribuidas uniformemente en el planeta, pero hay varias zonas donde estos materiales son abundantes, en especial en el llamado "cinturón de fuego" (Martirena Hernández 2003). Por otro lado, las puzolanas artificiales son subproductos de procesos altos consumidores de energía, ya sea por las altas temperaturas requeridas en la calcinación o combustión de materias primas, así como por el alto costo tecnológico asociado al mismo. Sus producciones principales se centran en países desarrollados, donde materiales como la ceniza volante (flyash), el humo de sílice (silica fume), las escorias de fundición (blastfurnaceslag) y arcillas calcinadas (metakaolin) se muestran como las de mayor aceptación para la producción de cementos mezclados.

1.4.3. Los cementos puzolánicos.

Las puzolanas pueden usarse de dos formas fundamentales, en las llamadas mezclas cal-puzolana o como adiciones al cemento Portland o al clínquer de cemento Portland (o sea, pueden molerse juntos o por separado). Las mezclas de puzolanas con cemento Portland reciben el nombre de cementos puzolánicos.

En la hidratación del cemento portland las principales fases mineralógicas producen C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y además portlandita a la solución, lo cual se estima entre un 20 y 30% en masa. La portlandita no aporta un beneficio a la acción mecánica de la matriz cementante, sin embargo, mantiene un ambiente alcalino (alto pH) necesario para evitar la corrosión del acero de refuerzo promovida por la carbonatación del concreto. Si adicionamos puzolanas al cemento portland, en primera instancia, en la hidratación, el cemento portland producirá portlandita, la cual reacciona con la puzolana para producir compuestos de C-S-H, similares a los producidos en la reacción del cemento portland. Los C-S-H son los responsables de la resistencia mecánica de las pastas, con las cuales se fabrican morteros o concretos. (VILLARREAL 2004)

1.4.4. Propiedades de los cementos puzolánicos.

El desarrollo de la resistencia de los hormigones con adiciones puzolánicas se distingue por su mayor lentitud con respecto a sus semejantes sin sustitución, mientras que su magnitud puede llegar a ser igual o superior que los patrones, apreciándose un mayor efecto en este sentido en las mezclas pobres. Se destaca la influencia de las condiciones de curado, requiriéndose un ambiente húmedo para lograr una adecuada hidratación. La evolución de la resistencia de la manera descrita se comprende por el hecho de que una determinada sustitución, a los efectos prácticos significa una reducción en el contenido real de cemento y que para que ocurra la reacción puzolánica debe formarse primeramente una cierta cantidad de cal de hidrólisis.

Un segundo efecto de la incorporación de puzolanas es la disminución de la proporción de aluminato tricálcico (C3A) en el cemento, lo cual resulta muy favorable pues como se sabe es este compuesto el principal responsable de la susceptibilidad del cemento Portland a los sulfatos. Un mecanismo muy simplificado de este tipo de corrosión puede explicarse como la conversión del sulfoaluminatomonocálcico

formado por la hidratación del C3A, a ettringita, siendo esta transformación de carácter expansiva y causante entonces del deterioro del aglomerado. También es el C3A uno de los minerales que más aporta al calor de hidratación del cemento, por lo que su disminución es muy favorable en ese sentido, siendo una de las vías más recomendables para el control de la temperatura en elementos constructivos de hormigón en masa.

El hecho de que las puzolanas reaccionen con la cal derivada de las reacciones de hidratación del cemento (C3S y C2S) hace que los hormigones con ellos elaborados sean más resistentes a la corrosión provocada por las aguas blandas. Como es conocido, tal corrosión se produce principalmente por la lixiviación de la portlandita por aguas muy blandas o con CO₂ agresivo.

1.5. Conclusiones parciales del capítulo

1. Los morteros como material constructivo han evolucionado desde la antigüedad clasificándose en función de la fabricación, composición y usos. Tomando como referencia su clasificación según el tipo de aplicación, estos están integrados por tres grandes grupos: morteros para determinar la calidad de los cementos, morteros de albañilería y morteros especiales.
2. La norma cubana NC 175:2002 *Morteros de Albañilería. Especificaciones* plantea especificaciones para cinco tipos de morteros, siendo los tipos II y III los más empleados para revestimiento y colocación en interior y exterior de muros portantes y de cierre.
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 pull out y cristalización de sales y humedecimiento y secado.
4. Debido a sus particulares características químicas y mineralógicas, que definen su empleo en la fabricación de morteros y su compatibilidad con los sustratos en que serán aplicados, el empleo de materiales cementicios suplementarios producidos a partir de minerales arcillosos pueden ser una atractiva alternativa

como fuente para garantizar la durabilidad de los morteros de reparación en obras patrimoniales.

5. La utilización del cemento LC3 constituye una opción muy interesante para el uso en morteros de albañilería pues permite lograr un aglomerante similar a los utilizados históricamente, y por otra parte aprovecharía las potencialidades locales para su uso.

CAPÍTULO II. EMPLEO DEL CEMENTO LC3-50 EN MORTEROS DE ALBAÑILERÍA.

2.1 Generalidades

En el siguiente capítulo quedan definidas las características de las materias primas empleadas para la fabricación de morteros de albañilería mediante ensayos realizados a cada una de forma independiente. Además se establece el proceso de formulación de los morteros según la NC 175:2002 *Morteros de albañilería. Especificaciones*, empleando cementos ternarios con sustituciones del 50% de clínquer por una mezcla de arcilla calcinada y caliza. Teniendo en cuenta las dosificaciones se diseñaron 2 series de morteros incluyendo las mezclas con el cemento P35, lo que da un total de 24 probetas.

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 NC 175:2002.

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.

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 (ver Fig. 2.1 b) y el P35 producido en la fábrica de cemento Carlos Marx en Cienfuegos.



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

2.3.1 Árido

Los áridos fueron caracterizados en el laboratorio de la UCLV en Villa Clara. En las tablas siguientes se muestran las características físico-mecánicas de la arena utilizada para la elaboración de las mezclas de morteros.

Material: 9.52- 4.76mm

Resultados de Ensayos.

Ensayos	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	0.84	≤ 1.0
Partículas de Arcillas (%)		
Partículas Planas y Alargadas (%)		≤ 10
Impurezas Orgánicas		
Pesos Específicos Corriente	2.40	≥ 2.50
Pesos Específicos Saturado	2.47	
Pesos Específicos Aparente	2.6	
Absorción (%)	2.76	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1388.3186	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1497.0345	
Porcentaje de Huecos (%)	37.50	
Módulo de Finura		

Análisis Granulométrico.

	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	94	24	5	2				
NC 251:2013			100	85- 100	15- 35	0-10	0-5				

Observaciones: El material no cumple con la NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos.

2.3.2 Cemento P-35

Uno de los cementos utilizados para producir los morteros fue el P-35 producido en la fábrica de cemento Carlos Marx en Cienfuegos

Resultados de Ensayos.

Ensayos Mecánicos						
	Resistencia a Flexión (MPa)			Resistencia a Compresión (MPa)		
	3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
Resultados				27	37	-
Según NC 95: 2011				17	25	

Ensayos Físicos.		
Ensayo	Resultados	Según

Finura de Molido (%)	6	NC 54 – 205/ 1980 10
Superficie Específica (m ² /kg)		
Consistencia Normal (%)		
Tiempo de Fraguado Inicial (min)		
Tiempo de Fraguado Final (min)		
Peso Específico Real (Kg/m ³)		

Obs: Para el ensayo Finura de Molido, la norma consultada – anteriormente enunciada - está derogada por la NC 980: 2013, pues en esta última no tiene en cuenta esta determinación.

2.3.3 Cal

El hidrato de cal fue adquirido en la fábrica de cemento de Siguaney, en sacos de 30 kg en estado seco. Los resultados de los ensayos de caracterización a la materia prima se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 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
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	%	1.91	1.91	1.91	NC 54-339/86
Óxido de Aluminio (Al ₂ O 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
Pérdida 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

2.3.4 Agua.

Para la realización de los ensayos se utilizó agua potable del servicio público, como lo especifica la norma *NC 353:2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros – Especificaciones*.

2.3.5 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

2.3.6 Caliza.

La piedra caliza que se emplea en la producción a escala industrial en la fábrica proviene de Guayos, municipio de Sancti Spíritus. La caracterización de la misma se realizó en el laboratorio de la fábrica, dichas características se muestran en la en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7: Composición química de la Caliza.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃
Por ciento (%)	4,12	1,15	0,64	51,59	1,21	40,92	92

2.3.7 Yeso.

El yeso empleado es proveniente de Punta Alegre, fue tomado en forma de roca del almacenamiento en la fábrica, y se caracterizó en el laboratorio de la misma, su composición química se muestra en la Tabla 2.8:

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 CaCO₃ y por toda su masa cristalitas 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.

2.3.8.2 Caracterización químico-mineralógica de las arcillas

La composición química de las arcillas mediante análisis por FRX se muestra en la tabla 2.9. Los altos contenidos de Fe₂O₃ 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 (CaO + 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 ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O 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

2.4 Producción de la adición 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*.

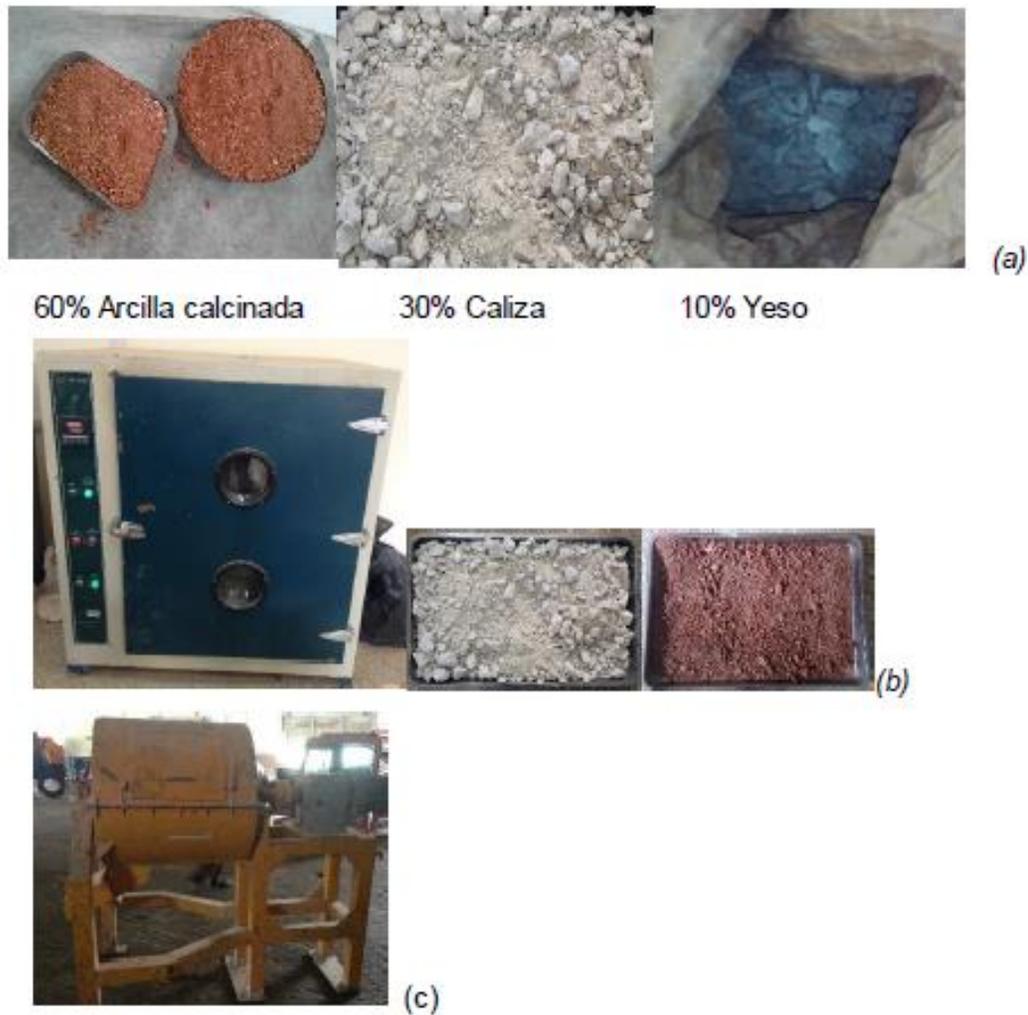


Figura 2.5 a), b) y c) Proceso de producción de LC²

Finura de molienda por tamizado.

Tabla 3.1 Ensayo de granulometría del LC² molido en UCLV

	LC ² molido en UCLV	
	Tamiz de 45 μm	Tamiz de 90 μm
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 µm	Tamiz de 90 µm
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 del laboratorio de la Facultad de Construcciones de la UCLV (Figura 2.7).

2.5 Fabricación de las mezclas de morteros.

Las mezclas de morteros de albañilería fueron elaboradas en el laboratorio de la Facultad de Construcciones. Primeramente y como lo indica la NC 175:2002 se dosificó volumétricamente cada material, según las proporciones establecidas en la Tabla 2.10 y posteriormente tuvo lugar el mezclado y amasado (Figura 2.7). En la Tabla 2.10 se presentan las series de morteros fabricadas.



Figura 2.7

Tabla 2.10: Dosificaciones de mezclas de morteros según NC 175:2002.

No. de mezcla	Mortero 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

Fuente: Elaborado por el autor.

2.5.1 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 lo establecido en dicha norma: 190 mm \pm 5 mm de diámetro (ver Figura 2.8).



Tabla 2.12: Determinación de la relación a/c.

Muestra	R a/c
M1	0.6
M2	0.6

2.5.2 Proceso de fabricación de las probetas. NC 173:2002

Para la elaboración de las probetas se limpiaron, engrasaron y armaron los moldes a utilizar según las especificaciones de la norma NC 173:2002. Se vertió una porción representativa de la muestra de aproximadamente 300 g de mortero en cada compartimento del molde, para formar una primera capa que se compactó en toda su superficie con 25 golpes suaves y homogéneos. Se vertió el resto del material y se repitió la operación de apisonado. Luego se eliminaron los espacios vacíos que quedaron en la superficie de los tres compartimentos. Cuando el mortero comenzó a endurecer, se enrasó el molde con una superficie metálica. Después de 24 horas de elaboradas las probetas se desmoldaron, se marcaron y se sometieron al proceso de curado en un ambiente con humedad relativa de aproximadamente un 90 % .Por cada muestra se fabricaron 3 moldes de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm

para la realización de los ensayos programados en el diseño de experimento. ((Figura 2.9, a) y (b))



Figura 2.9: Producción de probetas prismáticas (a, b).

2.6 Ensayos físico-mecánicos a probetas de morteros. Procedimientos.

2.6.1 Resistencia a flexión y compresión. (NC173, 2002)

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-Determinación de la resistencia mecánica.

Para el ensayo de flexión se colocaron las probetas en una prensa Caenao BCCCP (1975) y se apoyó sobre la cara opuesta de la probeta ejerciendo una carga P verticalmente y creciendo progresivamente (ver Figura. 2.10 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 40 x 40 mm de la probeta hasta que llegó a la deformación de esta. Se tomó, en ese momento, la carga de rotura (ver Figura 2.10 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.

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

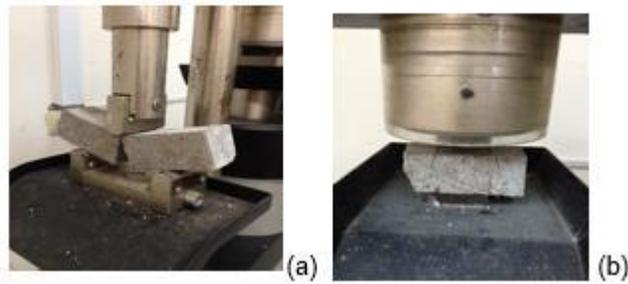
$$R_c = Q/1600 \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.2}$$

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



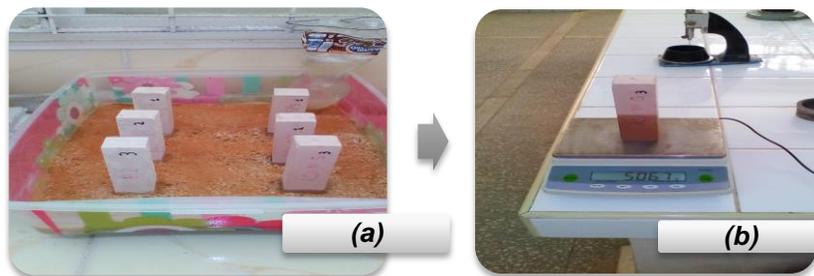
Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Absorción de agua por capilaridad. (NC171, 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 5 mm 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 (ver Figura 2.11). A las edades de 4 h; 8 h; 1; 3; 5 y 7 días a partir que comienza el ensayo se retiraron del recipiente y se pesaron anotando así los aumentos de peso que experimentaron las probetas. Los parámetros para el cálculo de la absorción se determinaron según la norma antes mencionada, mediante la ecuación 2.3.

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

Figura 2.11: Ensayo de absorción de agua por capilaridad.



Fuente: Elaboración propia

2.7 Conclusiones del capítulo.

1. El diseño de experimento permitió brindar una secuencia de pasos lógicos que guíen la investigación.
2. Los resultados a obtener con los ensayos físico-mecánicos como la resistencia a compresión, la absorción de agua por capilaridad, permitirán realizar la evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería con los cementos P35 y LC3.
3. La no conformidad del árido según los resultados del ensayo granulométrico puede incidir directamente en la calidad y propiedades de los morteros.
4. La caracterización de la adición producida se realizó mediante ensayos y especificaciones de las normativas vigentes, midiendo parámetros tales como: finura, superficie específica y resistencia.
5. Los ensayos realizados se llevaron a cabo siguiendo lo establecido en las normas cubanas vigentes 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 cementos de bajo contenido de carbono 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.

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	18.4
M-2	P-35	270	19

Fuente: Elaborado por el autor

En la tabla 3.1 se observa que el mortero M-2 necesita menos agua para lograr la consistencia adecuada. En el caso del M-1 se usa un cemento LC3 50(2:1), tiene un mayor % de sustitución del contenido de cemento por lo que absorbe mayor cantidad de agua. En ambos casos la consistencia cumple con la NC 175:2002.

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.

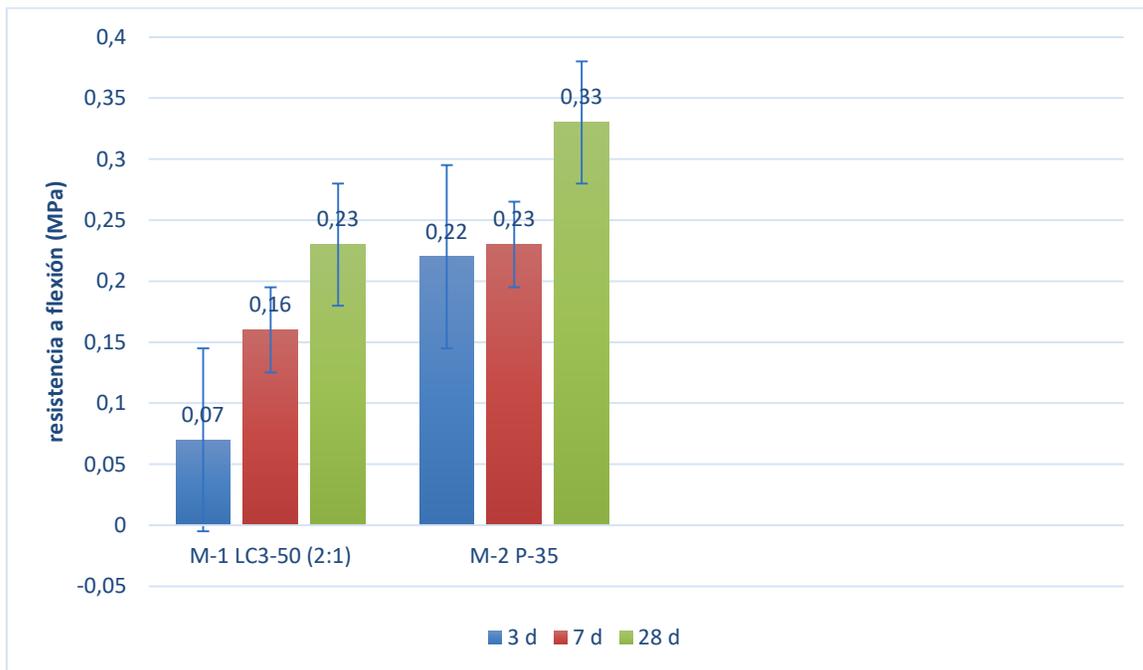


Figura 3.1: Gráfico de resistencia a flexión.

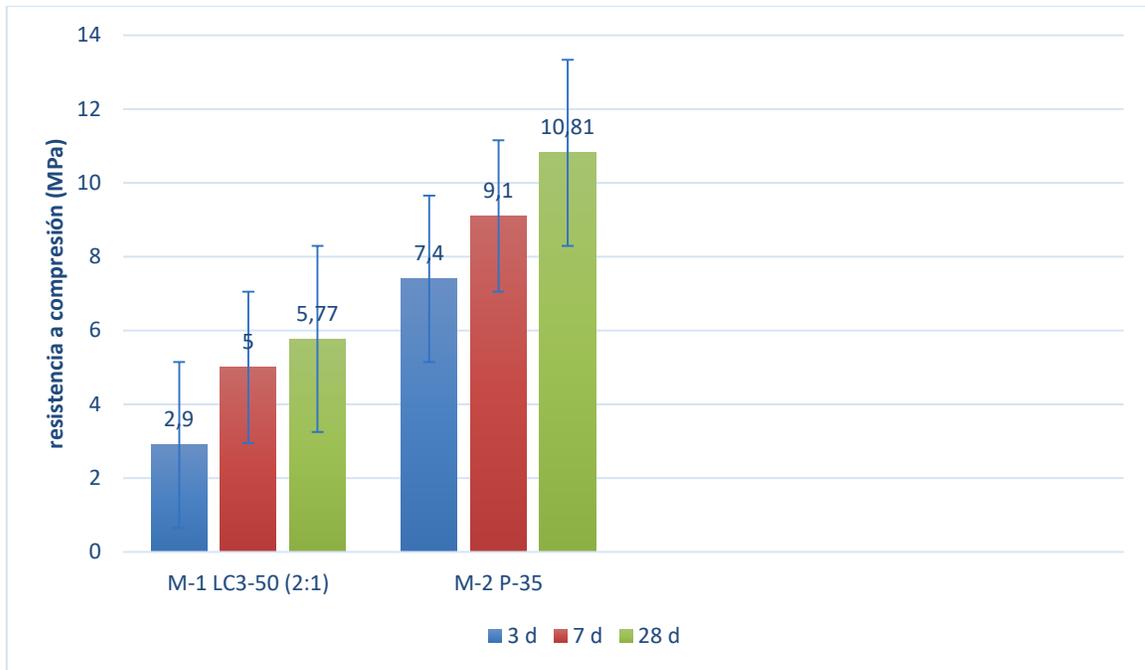


Figura 3.2: Gráfico de resistencia a compresión.

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

Serie de mortero	Características de los morteros			NC 175:2002	
	Dosif (c:a:cal)	Tipo de cemento	f'c (MPa) 28 días	f'c (MPa) (Cemento P-35)	f'c (MPa) (Cemnto PP-25) Tipo II
M1	1:4:1	LC3-50 (2:1)	5.77	8.9	3.5

Fuente: Elaborado por el autor.

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

Fuente: Elaborado por el autor

Según los valores obtenidos, se aprecia que la absorción capilar en morteros elaborados con la adición LC2 es inferior a la que presentan los morteros elaborados con el cemento de referencia P-35. En la Fig. 3.5a y 3.5b se observa el comportamiento de la absorción para cada mortero en las diferentes edades de ensayo.



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

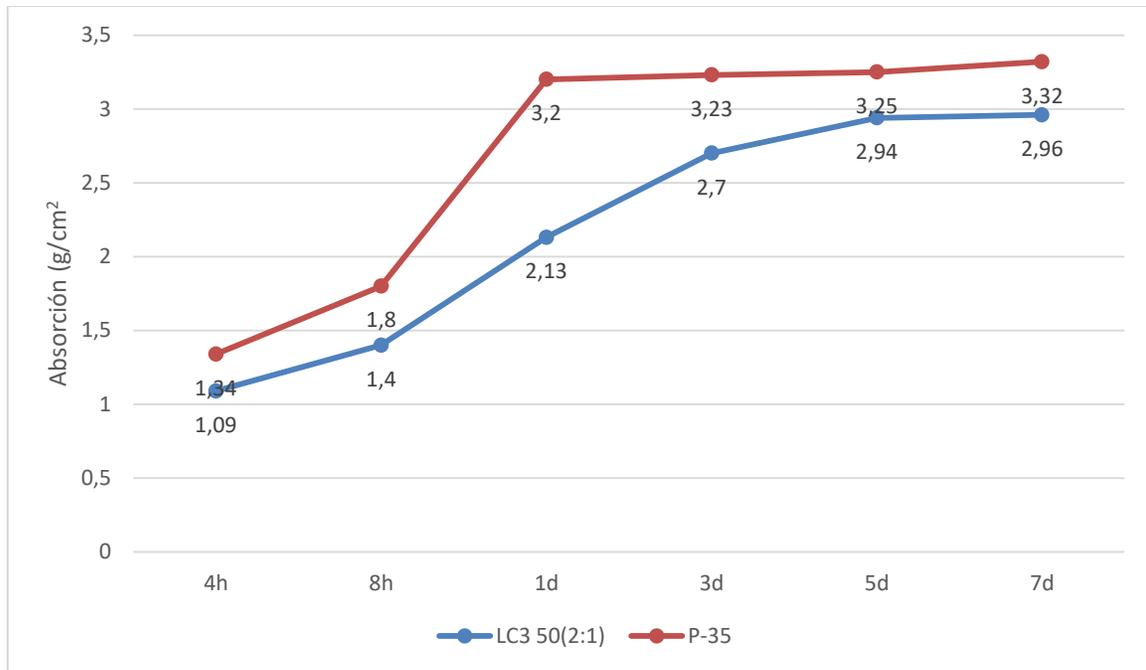


Figura 3.5b: Gráfico de absorción de agua por capilaridad.

3.4 Protocolo para la realización de los ensayos de cristalización de sales, humedecimiento y secado y pull out a las muestras elaboradas con P-35 y LC3.

A continuación como resultado principal de esta investigación se muestra el protocolo para hacer un estudio de durabilidad a morteros elaborados con varios tipos de aglomerantes.

1. Selección de las materias primas.
2. Preparación de las materias primas.
3. Caracterización de las materias primas.
4. Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar de agua.
5. Realización de los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar a las probetas de morteros.
6. Preparación de las muestras de morteros con sustratos de ladrillos para los ensayos de pull out y cristalización de sales y humedecimiento y secado.
 - La fabricación de estas muestras se realizó uniendo dos ladrillos con una capa de mortero de una pulgada de espesor la cual se compactó con 25

golpes suaves y homogéneos, posteriormente se sometió al proceso de curado durante los 28 días. Para cada tipo de cemento (LC3-50 (2:1) fig 2.6a) y (P-35 fig 2.6b) 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.

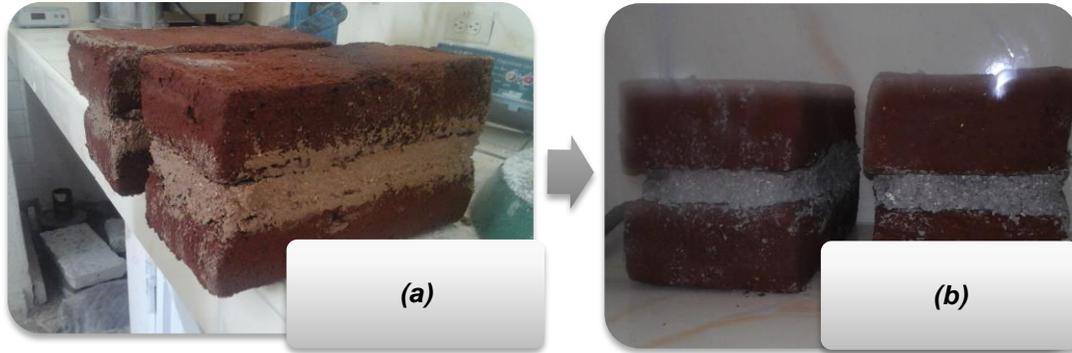


Figura 2.6: Proceso de fabricación de las muestras (a y b)

7. Realización de los ensayos de humedecimiento y secado y cristalización de sales a los testigos seleccionados.
8. Extracción de los testigos de 5 cm de diámetro.
9. Realización del ensayo de pull out.

Ensayo de ciclos de humedad-secado:

En el ensayo de humedecimiento y secado los especímenes estarán 24h sumergidos en agua, luego se secaran en la estufa a 60°C por 3 o 4 horas hasta llegar a peso constante, se pondrán a temperatura ambiente durante 2h y luego se introducirán en el agua nuevamente hasta completar los 30 ciclos según la norma UDC 666-97:620-11:1991.

Ensayo de Pull Out:

Para realizar este ensayo se tomarán los especímenes de ladrillos con los morteros 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.

Ensayo de cristalización de sales:

El ensayo de cristalización de sales estudia los efectos dañinos de las sales solubles que pueden cristalizar en los poros y fisuras del ladrillo. Se sigue el procedimiento establecido en la norma **UNE 7-136-58**.



Figura 2.7 Estufa

Las muestras se someten a un total de 15 ciclos. Cada ciclo consta de tres fases:

- ✓ inmersión en solución NaCl a un 3% a 20°C durante 24 horas.
- ✓ secado en estufa (Figura 2.7) a 60°C durante 4 horas hasta llegar al peso constante.
- ✓ enfriamiento a temperatura ambiente (20 °C) durante 2 horas.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo.

1. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con LC3 no cumple con las especificaciones establecidas para morteros IV NC175:2002
2. La absorción capilar en los morteros elaborados con cemento LC3 adquiere valores inferiores a los morteros de referencia elaborados con cemento P-35.
3. En nuestro país no existen normativas que brinden valores de comparación para la evaluación del ensayo de absorción por capilaridad, pero sus

resultados nos permiten emitir un criterio de evaluación sobre el grado de porosidad presente en el material y con ello obtenemos un parámetro de durabilidad.

4. 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.
 - Preparación de las materias primas.
 - Caracterización de las materias primas.
 - Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar de agua.
 - Realización de los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar a las probetas de morteros.
 - Preparación de las muestras de morteros con sustratos de ladrillos para los ensayos de pull out y cristalización de sales y humedecimiento y secado.
 - Realización de los ensayos de humedecimiento y secado y cristalización de sales a los testigos seleccionados.
 - Extracción de los testigos de 5 cm de diámetro.
 - Realización del ensayo de pull out.

Conclusiones Generales:

1. La utilización del cemento LC3 constituye una opción muy interesante para el uso en morteros de albañilería pues permite lograr un aglomerante similar a los utilizados históricamente, y por otra parte aprovecharía las potencialidades locales para su uso.
2. El empleo de morteros con cementos puzolánicos han sido estudiado a nivel internacional, demostrando que el uso de la arcilla calcinada como material cementicio suplementario proporciona mejoras a las propiedades hidráulicas, la durabilidad y resistencia mecánica en los morteros.
3. La resistencia a compresión a los 28 días de edad de los morteros elaborados con LC3 no cumple con las especificaciones establecidas en la norma cubana NC175:2002 si son comparadas con morteros tipos IV establecidos por dicha norma.
4. La absorción capilar en los morteros elaborados con LC3 adquiere valores inferiores a los morteros de referencia elaborados con cemento P-35.
5. 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.
 - Preparación de las materias primas.
 - Caracterización de las materias primas.
 - Confección de las probetas para los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar de agua.
 - Realización de los ensayos físico-mecánicos y absorción capilar a las probetas de morteros.
 - Preparación de las muestras de morteros con sustratos de ladrillos para los ensayos de pull out y cristalización de sales y humedecimiento y secado.
 - Realización de los ensayos de humedecimiento y secado y cristalización de sales a los testigos seleccionados.
 - Extracción de los testigos de 5 cm de diámetro.
 - Realización del ensayo de pull out.

Recomendaciones:

1. Realizarle los ensayos de pull out, humedecimiento y secado y cristalización de sales a las muestras elaboradas para un mejor estudio del comportamiento del cemento LC3 en morteros de albañilería.
2. Aplicar el protocolo diseñado a muestras de morteros tanto elaborados con LC3 como con cualquier otro aglomerante en una posterior evaluación.

Bibliografía

AFAM, s. f.-a. ""Características de los morteros" en Construmática." from [http://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas de los Morteros](http://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas_de_los_Morteros).

AFAM, s. f.-b. ""Morteros de albañilería" en Construmática." from www.construmatica.com/construpedia/Morteros de albañilería.

Alujas Díaz, A. (2010). "Obtención de un material puzolánico de alta resistencia a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. Tesis Doctoral. Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV."

Álvarez, C. (2014). "Evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería elaborados con cemento de bajo carbono (CBC). Trabajo de Diploma. Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV."

Álvarez Cabrera, J. L. (2011). "Morteros de albañilería. Antecedentes, clasificación, materiales, métodos de ensayo y tablas de resultados. La Habana: Obras de la UEB."

Álvarez, D. (2013). Propuesta de mezclas de morteros históricos para la restauración de edificaciones en el Centro Histórico de Remedios, Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV.

Anon (2011). "Revisión bibliográfica."

Arriola, J. M. (2009). "Diseño de morteros con cementos hidráulicos para la construcción de muros con elementos de mampostería. Trabajo de Diploma. Guatemala, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala."

Barrera, H., Luna, P., y D. Faúndez (2002b). "Estudio Teórico - Experimental de las Propiedades de los Morteros de Junta para Albañilería. Santiago de Chile."

Barrera, H., Luna, P., y D. Faúndez, (2002a). "Estudio de los morteros de junta, según NCh 2256/1, bajo la óptica de la adherencia. Santiago de Chile."

Blanco, V. M. y R. M. (2012). Caracterización de morteros históricos.

Castillo Lara, R. (2010). "Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza. Tesis Doctoral. Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV. ."

Fernández López, R. (2009). "Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries. Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias. À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE."

Hernbostel, C. (2002). "Materiales para construcción, tipos, usos y aplicaciones."

Kanan, M., Charola, Elena A and M. L. Magadán (2009). Manual básico de conservación para las misiones jesuíticas guaraníes: Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay= Manual básico de conservação para as missões jesuíticas dos guaraní: Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay/Manual básico de conservação para as missões jesuíticas dos guaraní, World Monuments Fund Unesco.

Lorenzo, M. C. V. (2017). EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN AL CEMENTO PORTLAND ORDINARIO DE UN PORCIENTO DE ARCILLA CALCINADA-CALIZA-YESO EN MORTEROS DE ALBAÑILERÍA. Ingeniería Civil, UCLV: Marta Abreu de las Villas.

María, A. (2014). Establecimiento de criterios de compatibilidad de materiales de reparación basados en ensayos acelerados de durabilidad in-situ.

Martirena Hernández, C. L., Rancés, et al. (2011). "Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones." Revista ingeniería de construcción26(1): 25-40.

Martirena Hernández, J. F. (2003). "Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis presentada para optar por el título de Doctor en Ciencias. Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV."

Mas i Barrerà, X. (2006). "Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico - ornamentales. Tesis doctoral. Valencia, Departamento de Conservación y Restauración de Nienes Culturales, Universidad Politécnica de Valencia."

Menéndez, J. (1946). "Una Lección sobre Morteros. Ciudad de La Habana."

Morante Portocarrero, A. A. (2008). "Mejora de la adherencia mortero-ladrillo de concreto. Trabajo de Diploma. Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú."

Orduña, A., et al. (2014). "UN ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA. PARTE I: COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MODELOS CONSTITUTIVOS."

Pérez Cabrera, F. (2013). ""Cuba, pionera en la producción de cemento ecológico" en Granma. (25 de marzo de 2013)."

R., F. (2014). "Pre-Proposal form for the Swiss Programme for Research on Global Issues for Development".

Reira Juan, S., y M. A. Gonçalves Soares (2010). "Análisis comparativo experimental de algunos morteros de restauración. Trabajo de Diploma. Catalunya, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (UPC)."

Renison, G. C. (2000). "Consideraciones y criterios que determinan el tipo de mezclas a utilizar en trabajos de albañilería."

Salazar Jaramillo, A. (2000). "Guía práctica. Morteros de pega para muros de mampostería. Cali."

Sánchez, F. J. (2002). ""Historia, caracterización y restauración de morteros". In: Pedro Cid. S.A."

Sequeira Ribeaux, J. E. s. f. "Temas aplicados a los materiales de construcción. Ciudad de La Habana."

Vidaud, E. (2003). "Eflorescencias en el concreto. Mecanismo y terapéutica."

VILLARREAL, R., R (2004). "Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. CIENCIA UANL VII, 190-196."

Vizcaíno Andrés, L. M. (2014). "Cemento de Bajo Carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza. Tesis Doctoral, UCLV, Tesis Doctoral. Santa Clara, Departamento de Ingeniería Civil, UCLV."