

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



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de cementos de bajo carbono producidos localmente con sustitución del 50% de cemento P-35 por adiciones de polvo de cerámica roja y caliza.

Diplomante: Lizabeth Pérez Manso

Tutor: Msc. Arq. Yoandi Lima Triana

Asesor: Dr. Ing. Iván Machado López

Santa Clara

2016

*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado, un
esfuerzo total es una victoria completa”.*

Mahatma Gandhi

A mis padres:

Porque me siento muy orgullosa de ellos y no tiene precio el amor sin límites, el apoyo incondicional y la confianza que depositan en mí. Porque ellos son mi vida y a ellos se la debo, tenerlos es mi mayor bendición y felicidad.

A Dios porque siempre me ha acompañado.

A mis padres por ser mi fuente de inspiración.

A mi familia, en especial a mi tía Sarita y mis padrinos, por todo su amor, confianza y eterna consagración en el logro de mis deseos y sueños.

A Elvis, por su inmenso cariño, comprensión y ser mi fortaleza.

A mi tutor Yoandi, por brindarme sus conocimientos, su tiempo, atención y apoyo en el logro de esta investigación.

A Iván por asesorarme.

A los trabajadores de la ENIA, en especial a Irelys y Sardiñas.

A Sandy, Robe, Yoel, Ribalta, Diana y Leidy Laura, por su ayuda incondicional.

A mis amigos, por su enorme preocupación y cariño, los llevo en mi corazón.

A mis compañeros, por regalarme momentos inolvidables.

A mis profesores, por la preparación y los conocimientos brindados durante estos cinco años.

A los amigos de la familia, especialmente a Enrique, Vitico y Yaneski, por su apoyo desinteresado y confianza.

A Donatela, Maci y Amarilis, por sus hermosos gestos de cariño.

A todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a hacer realidad esta aspiración de convertirme en una profesional.

¡Muchas Gracias!

RESUMEN

La producción de cementos ternarios, a pequeña escala, ha sido objeto de investigación por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) debido a las diversas ventajas que ofrece. El presente trabajo muestra la formulación de dichos cementos ternarios que propone la sustitución de un 50 % de P-35, por adiciones de polvos de residuos de cerámica roja y caliza en proporción 2:1. Se toma como referencia al cemento Pórtland Puzolánico PP-25.

La fabricación de los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1) se efectuó a escala de laboratorio y se les realizaron ensayos químicos y físico-mecánicos para su caracterización de acuerdo con las especificaciones establecidas en las normas cubanas. Con estos aglomerantes producidos se elaboraron morteros de albañilería para evaluar su resistencia a flexo-compresión y la absorción de agua por capilaridad. Los resultados de los ensayos fueron analizados estadísticamente mediante el programa Statgraphics, lo que permitió el estudio del comportamiento de estos cementos.

De los cementos obtenidos solo el LC3-50 R (2:1) cumple con los requerimientos establecidos en la norma cubana NC 97: 2011 y las normas internacionales vigentes para cementos de albañilería.

Palabras claves: residuos de cerámica roja, cemento ternario (LC3), producción local, cementos mezclados

ABSTRACT

Ternary cements production on a small scale has been subject of research by the Center for Research and Development of Structures and Materials (CIDEM) due to various advantages. The present work shows the formulation of such ternary cements which proposes to replace 50% of P-35, by additions of red ceramic and limestone waste powders in the ratio 2:1. It is taken as a reference the Portland pozzolan cement PP-25.

The manufacture of cements LC3-50 L (2:1) and LC3-50 R (2:1) was carried out at laboratory scale and they were object of chemical and physical-mechanical test for its later characterization according to the specifications established in Cuban standards. With these new binders there were developed masonry mortars to evaluate their resistance to flexo-compression and water absorption by capillarity. Tests results were statistically analyzed using the Statgraphics software, which allowed to study the behavior of these cements.

From the cements that were produced, only LC3-50 R (2:1) meets the requirements established in the Cuban standard NC 97: 2011 and the existing international standards for masonry cements.

Key words: red ceramic waste, ternary cement(LC3), local production, mixed cements

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos mezclados.....	5
1.1 Cemento Pórtland.....	5
1.1.1 Fabricación, composición e hidratación	5
1.1.2 Clasificación de los cementos.....	8
1.1.3 Cementos Pórtland con adición de caliza	9
1.2 Materiales puzolánicos	11
1.2.1 Definiciones y clasificación	11
1.2.2 Ensayos y evaluación de las puzolanas.....	11
1.2.3 Interacciones entre la puzolana y el cemento Pórtland	12
1.2.4 Efecto de las adiciones de puzolanas en las propiedades de los cementos Pórtland 13	
1.3 Residuos de cerámica	15
1.3.1. Proceso de fabricación de productos cerámicos.....	15
1.3.2. Impacto ambiental	15
1.3.3 Reutilización de los residuos de cerámica	16
1.3.4 Beneficios de utilización de los residuos de cerámica.....	18
1.3.5 Polvo de ladrillo como puzolana	18
1.4 Cementos ternarios con arcillas calcinadas	19
1.4.1 Hidratación de pastas de cemento Pórtland-arcilla calcinada	20
1.4.2 Eficiencia de las arcillas calcinadas en pastas de cemento Pórtland	21
1.5 Cemento de bajo carbono (LC3).....	21
1.5.1 Producción local de cemento LC3	23
1.6. Normas de cementos mezclados.....	24
1.6.1 Normativas europeas.....	24
1.6.2 Normas regionales (Norte, Centro y Sur América)	26
1.7 Técnicas y métodos de ensayo.....	30
1.7.1 Ensayos que se le realizan al cemento según las normas cubanas.....	30
1.7.2 Otros Ensayos	30
1.8. Conclusiones parciales del capítulo.....	31
CAPÍTULO 2: Elaboración de cementos mezclados con residuos de cerámica roja y caliza	32
2.1 Generalidades.....	32

2.2	Diseño de Experimento	32
2.3	Selección y caracterización de las materias primas.....	34
2.3.1	Polvos de residuos de cerámica	34
2.3.2	Caliza	35
2.3.3	Cemento P-35	35
2.3.4	Árido normalizado.....	36
2.3.5	Árido triturado	36
2.3.6	Agua.....	38
2.3.7	Cal.....	38
2.3.8	Cemento de referencia	39
2.4	Protocolo de fabricación de los cementos	40
2.5	Ensayos para la caracterización del cemento.....	40
2.5.1	Determinación del fraguado inicial y final	40
2.5.2	Finura de molido (% pasado tamiz 90µm).....	41
2.5.3	Peso específico real.....	41
2.5.4	Superficie específica	41
2.5.5	Estabilidad de volumen Le Chatelier	42
2.5.6	Ensayos químicos.....	42
2.5.7	Ensayo de resistencia mecánica.....	42
2.6	Ensayos a los morteros	43
2.6.1	Producción de probetas prismáticas	43
2.6.2	Ensayo de resistencia a flexo-compresión	44
2.6.3	Determinación de la absorción de agua por capilaridad.....	44
2.7	Conclusiones parciales.....	44
Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados		45
3.1	Generalidades	45
3.2	Análisis de los resultados de los cementos	45
3.2.1	Ensayos de caracterización	45
3.2.2	Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica de los cementos	49
3.4	Análisis de los resultados de morteros.....	53
3.4.1	Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia mecánica de los morteros.....	53
3.4.2	Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de absorción capilar	57
3.5	Conclusiones parciales.....	58

CONCLUSIONES GENERALES	59
RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	68
Anexo I. Consistencia en morteros.....	68
Anexo II: Análisis estadístico de la resistencia a compresión a los 28 días de los cementos LC3-50 L (2:1), LC3-50 L (2:1) y PP-25	68
Anexo III. Análisis estadístico de la influencia de los cementos en la resistencia a compresión (28 días) de los morteros evaluados	71
Anexo IV: Resultados estadísticos del análisis de la influencia de los cementos en la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de ensayo	74

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental y el impulso al desarrollo sostenible son temas cada vez más cotidianos en los últimos años, la conciencia colectiva va en aumento con respecto a los problemas potenciales que genera el crecimiento de la industria de la construcción en el deterioro del medio ambiente. En términos generales, la construcción no es una actividad amigable con el medio ambiente, ya que provoca efectos sobre la tierra, agotamiento de recursos naturales, generación de residuos y diversas formas de contaminación como son las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) (Hill and Bowen, 1997, Department, 2006, Habert et al., 2012, Wadel, 2014). Cerca del 85 % de estas emisiones provienen de la fabricación del cemento (Silva et al., 2015). Debido a la importancia del mismo en la industria de la construcción, muchos estudios se ocupan de sus perspectivas futuras (Szabó et al., 2006, Taylor et al., 2006, Pardo et al., 2011): mejoras en el horno del cemento, el uso de combustibles alternativos y adiciones minerales, entre otras, que permiten a la industria del cemento reducir las emisiones de CO₂ y los altos gastos energéticos que su producción emana.

La utilización de los residuos como material puzolánico en el ciclo productivo del cemento y de sus derivados, resulta una alternativa atractiva para disminuir el CO₂ emitido a la atmósfera, ya que aumenta la fracción en volumen de materiales cementicios suplementarios (MCS) disponibles y se suma a aquellos, como las cenizas volantes, escorias, puzolanas volcánicas y fillers que producen concretos más sostenibles ambientalmente, y también producen mezclas con alta capacidad de trabajo (Mehta and Monteiro, 2006).

En este sentido la industria cementera en Cuba, ante su insuficiente desarrollo industrial, traza estrategias en busca de economizar el combustible tradicional y minimizar los efectos que provoca al medio ambiente la producción del cemento, para ello el país desarrolla diversos estudios en aras de producir nuevos cementos (Pérez, 2013).

En esta dirección trabajan un grupo de especialistas pertenecientes al Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en Cuba, de conjunto con la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) en Suiza desde el año 2009, quienes desarrollan un sistema cementicio novedoso a nivel mundial que ofrece ventajas de tipo económico y ecológico: el cemento de bajo carbono (LC3). Este cemento ternario se produce de manera industrial en la planta de cemento Siguaney en Sancti Spíritus y en su conformación los componentes que se

mezclan son el clínquer, la caliza y la arcilla calcinada, obteniéndose así un aglomerante de tipo puzolánico de calidad y prestaciones similares al cemento cubano PP-25.

Otra variante viable para la fabricación del cemento de bajo de carbono resulta la forma artesanal. Estas producciones artesanales se realizan en talleres que cuentan con las instalaciones y maquinarias necesarias para desarrollar el proceso productivo de este cemento. Su obtención se consigue a partir de la sustitución del 50 % del cemento P-35 por un 30 % de arcilla calcinada obtenida a partir de la trituración de piezas de cerámicas roja y un 20 % de piedra caliza sin calcinar (Martirena et al., 2015). En el logro de este propósito, el empleo de residuos provenientes de la industria cerámica como sustitutos parciales del cemento Pórtland constituye una opción viable dada su gran disponibilidad en el país y los beneficios técnicos y ambientales que su uso promueve.

Situación problemática

Para el 2016 se espera no existan condiciones en cuanto a cantidad de materia prima para cumplir con la demanda de cemento exigida, debido a los incrementos de la producción, por lo que se hace necesario aumentar la fabricación y el uso de los cementos con adiciones, así como el nivel de sustitución de clínquer en el cemento (Martirena, 2014).

Con el propósito de buscar nuevas alternativas aplicables en el país, en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), desde el 2009 se realizan investigaciones sobre cementos con elevados porcentajes de sustitución de clínquer por arcillas calcinadas y caliza, y se ha demostrado que además de la producción industrial, es posible producir a pequeña escala un cemento ternario de bajo carbono. Este cemento se produce mezclando cemento P-35, polvo obtenido a partir de residuos de la producción de cerámica roja y piedra caliza (Aguilar, 2015).

La producción de estos cementos puzolánicos, a pequeña escala, ofrecen diversas ventajas ya que generan bajos índices de consumo de energía, aprovechan las fuentes locales de materias primas, principalmente los desechos de la fabricación de cerámica roja, posibilitan el comercio local del producto y contribuyen significativamente al desarrollo de una producción descentralizada que posee bajos costos de inversión inicial y una recuperación rápida (Martirena et al., 2015). Esto conlleva al planteamiento de la siguiente **interrogante**

científica:

¿En qué medida la producción de cemento de bajo carbono (LC3) a escala local, a partir de la combinación del 50 % de cemento P-35 con adiciones de polvos de cerámica roja y caliza, logra aglomerantes con propiedades físicas y mecánicas que cumplan con las normativas vigentes para cementos con adición activa?

Hipótesis de Investigación

Mediante la fabricación artesanal de cementos ternarios, a partir de la combinación del 50 % cemento P-35 con adiciones de polvos de cerámica roja y caliza, se logran aglomerantes que cumplen con las normativas vigentes para cementos con adición activa (NC 96-2011).

Objetivo General

- ❖ Evaluar el comportamiento físico mecánico del nuevo cemento LC3 producido de forma artesanal en Villa Clara a partir de la combinación del 50 % de cemento P-35 con adiciones de polvo de cerámica roja y caliza.

Objetivos específicos

- ❖ Establecer antecedentes teóricos sobre las características y propiedades de los cementos mezclados que son elaborados artesanalmente, y el uso de los residuos de cerámica roja como adición puzolánica.
- ❖ Elaborar un aglomerante sobre la base de un sistema cemento P-35, polvo de cerámica roja y caliza a partir de un nivel de sustitución del 50 % bajo condiciones de producción artesanal, con propiedades mecánicas similares al cemento Pórtland Puzolánico.
- ❖ Evaluar el comportamiento físico mecánico de los cementos y morteros fabricados, a la luz de los requerimientos establecidos en las normas vigentes a escala nacional e internacional.

Tareas científicas

1. Búsqueda bibliográfica que permita conocer el estado del arte de la temática a través de la revisión de la literatura más actualizada sobre el tema.
2. Obtención y caracterización de las materias primas que se emplearán en la elaboración de los cementos.
3. Producción de los cementos LC3 con adición del 50% de polvo de cerámica roja - caliza en proporción 2:1 bajo condiciones de producción artesanal.
4. Producción de los morteros con los cementos (LC3) elaborados.
5. Caracterización de los cementos producidos.
6. Análisis y evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los cementos a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.
7. Análisis y evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los morteros a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.

Novedad científica:

Demostrar que los cementos producidos de forma artesanal, con sustitución del 50% de P-35 por polvo de cerámica roja y caliza mantienen las propiedades físico-mecánicas exigidas según la normativa vigente para cementos con adición activa.

Aporte Práctico:

Demostrar que la producción artesanal de cemento utilizando residuos de cerámica roja y caliza con altos volúmenes de sustitución puede ser una alternativa económica y ambientalmente sustentable para el país.

Estructura de los capítulos:

- Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos mezclados.

Se presenta una revisión bibliográfica de los antecedentes de los cementos mezclados. Se define la necesidad de la implementación de materiales cementicios suplementarios para la producción de cemento con altos niveles de sustitución. Se hace referencia a la producción de cemento a escala local.

- Capítulo II: Elaboración de cementos mezclados con residuos de cerámica roja y caliza.

En este capítulo se expone el diseño de experimentos, se caracterizan las materias primas que se utilizan para la producción de los cementos, se describe el proceso de obtención de los cementos con sustitución de 50 % de P-35 por polvo de cerámica roja y caliza. Concluida esta etapa se desarrollan los principales ensayos que permiten evaluar el comportamiento físico-mecánico de los nuevos cementos (Resistencia mecánica, peso específico, finura, tiempos de fraguado inicial y final, consistencia normal, entre otros).

Concluida esta etapa, con estos aglomerantes producidos se elaboraron morteros de albañilería para evaluar algunas de sus propiedades como la resistencia mecánica y la absorción.

- Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados.

Se muestran los resultados obtenidos en los ensayos y se comparan con la referencia de cemento Pórtland Puzolánico para evaluar si el cemento mezclado que se obtiene cumple con las especificaciones de calidad establecidas en las normativas cubanas para cementos con adición activa (NC 96-2011).

Capítulo 1: Fundamentos teóricos sobre la fabricación de cementos mezclados

1.1 Cemento Pórtland

El cemento Pórtland (CPO) se ha convertido en uno de los materiales más importantes en el mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad y con mayor nivel de producción a escala mundial. En el período comprendido entre los años 2000-2011 la industria de cemento duplicó su producción, alcanzando los 3600 millones de toneladas (U.S.G.S., 2002, U.S.G.S., 2013). Para el 2050 se estima que la demanda de este aglomerante supere los 5000 millones de toneladas (Vanderley, 2002, Taylor et al., 2006, Cembureau, 2010, Olivier et al., 2012).

1.1.1 Fabricación, composición e hidratación

El cemento Pórtland es un material inorgánico que está formado básicamente por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción, hasta la síntesis, de una mezcla de caliza y arcilla que recibe el nombre de clínquer y de un material empleado como regulador de fraguado que generalmente es yeso hidratado. El clínquer está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminato de cal, esto hace que en la composición de las materias primas que van a formar el crudo, que luego se cuecen en el horno hasta temperaturas de 1450 °C, han de estar los óxidos de sílice, aluminio y cal en proporciones muy concretas (Cánovas, 2002).

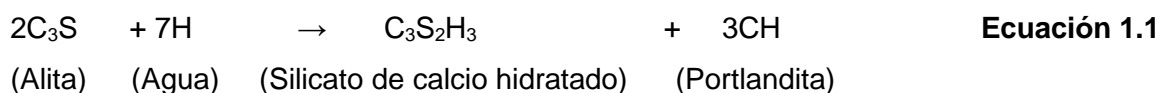
Las cuatro fases mayoritarias del cemento son: el silicato tricálcico o alita (C_3S), el silicato bicálcico o belita (C_2S), el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferrito aluminato tetracálcico o celita (C_4AF). La composición mineralógica del clínquer es fundamental por la influencia que tiene en las propiedades del material endurecido y su resistencia (Monteagudo, 2014).

Cuando el CPO es mezclado con agua, comienza la hidratación de los silicatos y los aluminatos dando lugar a un endurecimiento y rigidización de la masa que se conoce con el nombre de cemento endurecido. La hidratación se produce mediante una reacción con el agua y una hidrólisis (Cánovas, 2002).

Desde un punto de vista químico, las reacciones de hidratación son un complejo proceso de disolución-precipitación en el que se disuelven los componentes más solubles del cemento anhidro, formando una fase acuosa iónica a partir de la cual y, en función del grado de saturación de dichos iones, precipitarán los hidratos correspondientes en forma de coloides o hidratos cristalinos (Heche, 2011).

Las principales reacciones químicas de hidratación que tienen lugar cuando los componentes del cemento entran en contacto con el agua están reflejadas en las Ecuaciones 1.1 - 1.4. Los compuestos mayoritarios son el gel de tobermorita (CSH) y la portlandita (CH), además aparecen otros compuestos como la etringita (fases AFt), monosulfoaluminatos (fases AFm) y otros compuestos hidratados (Morejón, 2015).

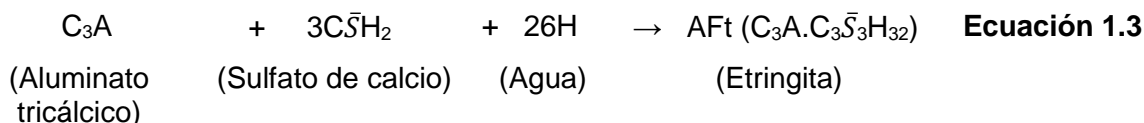
El C₃S constituye el componente principal del clínquer, formando alrededor del 50 % de este, tiene la propiedad de aportar las mayores resistencias iniciales al cemento. El calor de hidratación que libera es muy elevado (120 cal/g), reacciona según se muestra a continuación (Ecuación 1.1). Los productos de hidratación que se obtienen son el gel de tobermorita (CSH) y la portlandita (CH).

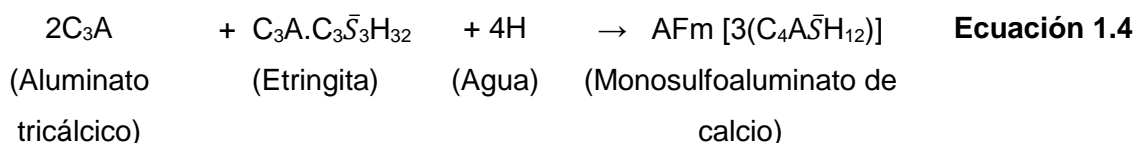


El C₂S aporta pocas resistencias a edades tempranas pero va alcanzando resistencias progresivamente hasta alcanzar al C₃S. Ocupa alrededor del 25 % del cemento, su calor de hidratación es bajo 60 cal/g y reacciona según se muestra a continuación (Ecuación 1.2), resultando gel de tobermorita (CSH) y portlandita (CH) como productos de hidratación.



El C₃A por sí solo no contribuye a la resistencia, pero en presencia de silicatos desarrolla resistencias iniciales buenas. Actúa como catalizador de la reacción de los silicatos. Su hidratación es muy rápida desarrollando un calor de hidratación de 207 cal/g, su contenido está alrededor del 10 %. Para retrasar su actividad se emplea yeso que actúa como regulador de fraguado. Uno de los inconvenientes, es que provoca hormigones y morteros muy sensibles al ataque de sulfatos y otros agentes agresivos. Reacciona según las siguientes ecuaciones y se obtienen la etringita (fase AFt) y el monosulfoaluminato de calcio hidratado (fases del tipo AFm), (Ecuación 1.3 y Ecuación 1.4).





El C_4AF apenas contribuye a las resistencias del cemento, su hidratación es rápida pero más lenta que la del aluminato y posee un calor de hidratación de 100 cal/g. Es el fundente en el horno y el responsable del color gris verdoso del cemento. Su contenido en el cemento está alrededor del 8 %. Numerosos tipos de fases AFm pueden ocurrir cuando los iones que estas contienen son liberados a la solución de poros de la pasta hidratada, y son clasificados en dependencia del anión que contienen.

Todas las ecuaciones de reacción planteadas anteriormente han sido idealizadas, pues la composición variable de los productos de hidratación, y su tendencia a modificar su constitución en dependencia de la solución de poros, impiden asignarles una estequiometría fija. Es importante resaltar también el carácter exotérmico de estas reacciones y, por tanto, la directa relación que existe entre la hidratación del CPO y el calor de hidratación (Alujas, 2010).

El cemento Pórtland constituye actualmente la base para los cementos más comúnmente usados. Su proceso de fabricación obedece al desarrollo de varias etapas (Martínez and Hurtado, 2014):

- a) Extracción, preparación y trituración de las materias primas.

Las materias primas deben triturarse al menor tamaño para obtener una mejor homogenización en la mezcla de las mismas, aspecto definitivo para que después se produzca una reacción química completa.

- b) Dosificación y homogenización de las materias primas.

La dosificación depende de la composición química de las materias primas, para lo cual es necesario efectuar continuamente análisis químicos que permitan dosificar con la mayor exactitud. Para realizar la mezcla, homogenización y conducción al horno se distinguen tres métodos: por vía húmeda, vía semiseca y vía seca. El método utilizado marca la diferencia entre las fábricas de este producto y la selección de uno u otro depende de las condiciones en que se encuentre la materia prima en estado natural y de las condiciones climáticas de la zona, por la repercusión en los costos del producto. Además el método determina la longitud del horno, requiriendo mayor longitud cuanto más húmeda ingrese la mezcla.

- c) Cocción (obtención del clínquer).

Después de la homogenización, la mezcla pasa al horno rotatorio, que tiene una ligera inclinación con respecto a la horizontal para facilitar el avance del material en el horno cuando este gira sobre su eje. En el extremo opuesto al de ingreso de la mezcla se encuentra el sistema para calentamiento, con quemadores que trabajan con combustible como petróleo, gas o carbón pulverizado. La temperatura alcanzada es de 1450 °C, requerida para producir una fusión incipiente de la mezcla, que provoca la formación del clínquer en forma de esferas de diámetro entre 3 y 30 mm.

Los cambios que suceden en el horno son: inicialmente el secado de la mezcla si contiene agua, después de la liberación del CO₂ ocurren una serie de reacciones químicas hasta llegar a la fusión del 20 a 30% de la mezcla, combinándose así la cal, la sílice y la alúmina; y finalmente el enfriamiento del material.

d) Molienda del clínquer.

Durante esta etapa se agrega yeso hidratado para controlar la velocidad de hidratación de los aluminatos, y regular así el tiempo de fraguado.

En la actualidad, con el fin de disminuir los costos y mejorar ciertas características, adicionan al clínquer durante la molienda otras sustancias, que pueden ser: caliza, escoria o puzolanas.

Para concluir se realiza el empaque del cemento en sacos o se almacena en silos para distribuirlo a granel.

1.1.2 Clasificación de los cementos

De acuerdo a la norma *ASTM C-150* existen ocho tipos de cemento Pórtland: I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV, V.

Tipo I. Cemento común, para usos generales: Es el más empleado para fines estructurales cuando no se requieren de las propiedades especiales especificadas para los otros tipos de cemento.

Tipo II. Cemento modificado para usos generales: Este cemento adquiere resistencia con más lentitud que el tipo I y se emplea en exposiciones moderadas al ataque por sulfatos, o cuando se requiere un moderado calor de hidratación. Estas características se logran al imponer limitaciones en el contenido de C₃A y C₃S del cemento.

Tipo III. Cemento de alta resistencia inicial: Es recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. Este cemento se obtiene por un molido más fino y un porcentaje más elevado de C₃A y C₃S. Dado que este cemento tiene un gran desprendimiento de calor, no se debe usar en hormigones masivos. Con un

15 % de C_3A presenta una mala resistencia a los sulfatos. El contenido de C_3A puede limitarse al 8 % para obtener una resistencia moderada a los sulfatos o a 5 % cuando se requiere alta resistencia.

Tipo IV. Cemento de bajo calor de hidratación: Los porcentajes de C_2S y C_4AF son relativamente altos, el bajo calor de hidratación en este cemento se logra limitando los compuestos que más influyen en la formación de calor por hidratación (C_3A y C_3S). Dado que estos compuestos también aportan la resistencia inicial de la mezcla de cemento, al limitarlos se tiene una mezcla que gana resistencia con lentitud. Este cemento se usa para estructuras de hormigón masivo, con bajas relaciones superficie/volumen. Requiere mucho más tiempo de curado que los otros tipos.

Tipo V. Cemento resistente a los sulfatos: La resistencia al sulfato se logra minimizando el contenido de C_3A ($\leq 5\%$), pues este compuesto es el más susceptible al ataque por sulfatos. Este tipo se usa en las estructuras expuestas a los sulfatos alcalinos del suelo o del agua, a los sulfatos de las aguas freáticas y para exposición al agua de mar.

Con inclusión de aire, Tipo IA, IIA y IIIA: Estos tipos tienen una composición semejante a las de los tipos I, II y III, excepto que durante la fabricación, se muele junto con estos últimos un agente inclusor de aire. Este constituye un mal método para obtener aire incluido, ya que no se puede hacer variar la dosis del agente para compensar otros factores que influyan en el contenido de aire en el hormigón. Estos cementos se usan para la producción de hormigón expuesto a heladas severas.

En Cuba los tipos de cemento Pórtland se clasifican según la *NC 95:2011. Cemento Pórtland. Especificaciones*.

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

Cemento Pórtland 35: Cemento P- 35

Cemento Pórtland 45: Cemento P- 45

Cemento Pórtland 55: Cemento P- 55

1.1.3 Cementos Pórtland con adición de caliza

Durante las últimas dos décadas se han planteado diferentes discusiones acerca del grado de actividad de las calizas al ser incorporadas como adiciones al cemento, algunos autores sostienen que solo es un filler que no hace más que aumentar el volumen y disminuir los costos de producción. Otros por el contrario, piensan que es activa y que produce modificaciones químicas que se traducen en cambios en las propiedades físicas y

mecánicas del cemento. En lo que están de acuerdo todos es que las calizas de alta pureza (> 90 % de CaCO_3) son una muy buena adición para los cementos (Tobón and Kazes, 2008).

En el mundo es muy común la práctica de adicionar hasta el 5 % de caliza al cemento Pórtland para que cumpla el papel de un relleno (filler) (Tobón and Kazes, 2008). Se ha demostrado que adiciones entre 2-5 % intermolidas con el clínquer no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora (Matschei and Glasser, 2006, Matschei et al., 2007, Lothenbach et al., 2008, Vizcaíno, 2014).

La incorporación de caliza molida como reemplazo parcial del clínquer genera dos efectos sobre la hidratación del mismo: por un lado el efecto químico que tiene como consecuencia la formación de carboaluminatos de calcio hidratado, que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia (Bonavetti et al., 2001, Lothenbach et al., 2008) y por otro, el efecto físico que provoca la dispersión de los granos de cemento acelerando la velocidad de hidratación del mismo (Menéndez et al., 2006). El efecto de dispersión se atribuye a la ubicación de la adición entre los granos de cemento, que aumenta su área de contacto con el agua, y posibilita un aumento en la velocidad de hidratación inicial. Además, este incremento también se atribuye a que las partículas de caliza actúan como centros de nucleación alrededor de las cuales se depositan los cristales de hidróxido de calcio (CH) (Bonavetti, 1998, Rahhal and Talero, 2002). Desde el punto de vista de la resistencia, el efecto físico es el principal responsable del aumento de este parámetro a edades tempranas (Bonavetti and Rahhal, 1996, Péra et al., 1999, Matschei et al., 2007).

Recientemente, la norma europea UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, estableció dos clases de cementos, CEM II/A-L y CEM II/B-L, que permiten la incorporación de adiciones de caliza que pueden llegar hasta el 20 y 35 %, respectivamente; mientras que en países como Canadá, Australia y Nueva Zelanda se admite hasta el 15 % (Tsvilis et al., 1999, Hawkins et al., 2003, Tennis et al., 2011). Estos tipos de cementos calizos, para superar o mantener los beneficios del CPO, requieren de una mayor finura, para lo cual se necesitan adecuadas técnicas de molienda (Damtoft et al., 2008, Barcelo, 2013).

1.2 Materiales puzolánicos

1.2.1 Definiciones y clasificación

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM C 618-92) define como puzolanas a aquellos productos naturales o artificiales, silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (Ca OH_2) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

La clasificación más comúnmente aceptada de las puzolanas se relaciona con el origen y en este sentido se dividen en dos clases: naturales y artificiales. Las puzolanas naturales son aquellas que se producen en la naturaleza y pueden tener origen volcánico, generalmente de carácter petrográfico, u origen sedimentario. Las artificiales son aquellas que requieren tratamiento térmico o provienen de subproductos industriales o agrícolas con actividad puzolánica (Mehta and Monteiro, 1994, Lima, 2004, Sepulcre, 2005, López, 2008, Rogers, 2011).

Dentro de las puzolanas naturales se encuentran los depósitos piroclásticos, esencialmente vítreos; las rocas volcánicas porfídicas; los vidrios alterados hidrotermalmente por rocas volcánicas; las zeolitas procedentes de transformación de rocas volcánicas y los sedimentos clásticos.

Como puzolanas artificiales se destacan las escorias de alto horno, granuladas y cualquier otra escoria enfriada rápidamente; las cenizas volantes; los humos de sílice; las cenizas de arroz; las arcillas activadas o calcinadas artificialmente.

1.2.2 Ensayos y evaluación de las puzolanas

Determinar la actividad de una puzolana es esencial si se quiere emplear como producto activo en una mezcla conglomerante. La misma comprende un conjunto de métodos mediante los cuales puede evaluarse la reactividad de una puzolana con la cal. La velocidad de reacción entre estos dos compuestos básicos está determinada fundamentalmente por la composición química y la estructura de los materiales, así como por otros factores externos: finura, temperatura proporciones en que se encuentren las sustancias reaccionantes, entre otros; aspectos que deben considerarse a la hora de aplicar cualquiera de los diversos métodos existentes (Martirena et al., 2015).

El método de solubilidad ante el ataque ácido-base, que relaciona la actividad puzolánica con la parte soluble, considera marcadamente puzolánico si esta es mayor de un 20 %, aceptablemente puzolánico entre un 15-20 %, y no activo por debajo del 15 %, aunque este

sistema tiene muchas limitaciones, por la presencia de impurezas minerales, por la metodología del ensayo, entre otras (Sepulcre, 2005).

El método de Frattini constituye el más utilizado, incluido en las normas desde hace años, para medir la puzolanicidad de los cementos puzolánicos. En este se establece un método químico para medir la cantidad y calidad de puzolana en los cementos puzolánicos. Se realiza midiendo la cantidad de cal libre combinada en una disolución saturada de hidróxido cálcico, pero el problema es que parte del hidróxido cálcico que se genera en forma de portlandita en el cemento fraguado, queda envuelto por los geles de tobermorita, por lo que no puede mantener la concentración del hidróxido en la fase líquida (Sepulcre, 2005).

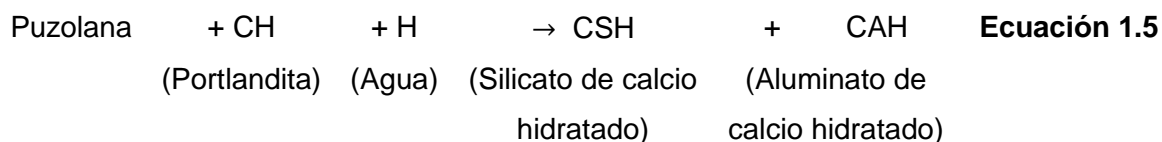
Los ensayos de resistencia mecánica medida a lo largo del tiempo son muy usuales, estos aunque muestran valiosos datos relacionados con el desempeño del material en la práctica y representan el aporte de todos los factores relacionados con la reacción puzolánica, por sí solos ofrecen poca información sobre los procesos responsables de la reactividad puzolánica y no pueden ser utilizados como única vía para entender el comportamiento de nuevos materiales puzolánicos (Alujas, 2010).

Los métodos térmicos mediante Análisis Termogravimétrico (ATG) permiten establecer en muchos casos, no solo de que productos de reacción se trata, sino también, en que proporciones se han formado. En este sentido a partir del ATG se puede realizar el monitoreo del contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en pastas CPO-Puzolana o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Puzolana (Alujas, 2010).

Las técnicas de Resonancia Magnética Nuclear de los isótopos ^{29}Si y ^{27}Al , la Difracción de Rayos X (DRX) y la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) son muy útiles para identificar y evaluar la estructura de los hidratos formados en las pastas de CPO y de CPO con adiciones puzolánicas (Andersen et al., 2003, Sagar and Singh, 2007).

1.2.3 Interacciones entre la puzolana y el cemento Pórtland

Las bases para el empleo de los materiales puzolánicos como sustitutos parciales del clínquer en el CPO o como materiales mezclados con el propio CPO, se fundamentan en las reacciones ácido-base en su concepción más general (Alujas, 2010). La puzolana cuando es introducida en este sistema, reacciona con el hidróxido de calcio o portlandita de la pasta de cemento (CH) produciendo nuevos compuestos cementicios resistentes, como el silicato de calcio hidratado (CSH) (Lima, 2004). Esta reacción es representada en la Ecuación 1.5 y se denomina reacción puzolánica.



Los compuestos formados durante la reacción puzolánica, como los aluminatos de calcio hidratados (CAH), actúan apenas como filler, reduciendo la porosidad de la estructura resultante. La combinación de los efectos puzolánico y filler provenientes de la reacción puzolánica representan una contribución importante para la resistencia y la durabilidad de la pasta endurecida frente a los medios ácidos (Lima, 2004).

Con respecto a las interacciones físicas de la puzolana en la pasta de cemento resultante de la reacción puzolánica, pueden ser considerados dos efectos: el refinamiento del tamaño de los poros y el refinamiento del tamaño de los granos, donde ambos procesos contribuyen al aumento de la resistencia de la pasta de cemento (Mehta and Monteiro, 1994).

Otro aspecto a ser considerado con relación a la reacción puzolánica es la forma más lenta en la que ocurre en comparación con las reacciones de hidratación del cemento Pórtland, resultando una velocidad de liberación de calor y desarrollo de resistencia consecuentemente lentas (Mehta and Monteiro, 1994, Ramachandran et al., 2002). La cinética de esta reacción dependerá, además de las características mineralógicas de la puzolana, de su finura y de la temperatura y concentración de los reaccionantes (Farias et al., 2000).

1.2.4 Efecto de las adiciones de puzolanas en las propiedades de los cementos Pórtland

Cuando se incorpora material puzolánico al CPO, los efectos que se producen sobre la hidratación pueden separarse en tres:

El efecto de dilución implica, para una misma relación agua/aglomerante, un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas y produce un aumento en la relación agua/cemento efectiva (Cyr et al., 2006, Alujas, 2010).

El efecto físico comprende la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas finamente pulverizadas de una superficie adicional que favorece la nucleación y el crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CPO (Alujas, 2010), y también, el aumento de la compacidad por efecto filler que produce que las partículas finas de las puzolanas rellenen el espacio vacío entre los granos de cemento modificando su empaquetamiento granular e implicando un cambio en la porosidad inicial de la pasta. Este

efecto modifica positiva o negativamente la demanda de agua requerida para mantener una laborabilidad dada de acuerdo a la granulometría y la proporción de las adiciones (Cyr et al., 2006). En virtud del efecto filler los morteros y concretos con adición de puzolanas tienen menor tendencia a sufrir los fenómenos de exudación y segregación (Lima, 2004).

El efecto químico que es la propia reacción puzolánica de la adición mineral, donde las reacciones de CH con la puzolana disminuyen la basicidad de las pastas y proporcionan una mayor compacidad de estas, aumentando así su resistencia química. Con esto, proporcionan una inhibición de las expansiones, fisuraciones y desagregaciones de las reacciones con los agentes agresivos (Lima, 2004). Algunas expansiones y fisuras son provenientes de las reacciones de algunos tipos de agregados (con presencia de silicatos o minerales de sílice) con los álcalis liberados en la hidratación del cemento (reacción álcali-agregado). Cuando las puzolanas son adicionadas, las mismas, tienden a reaccionar con los álcalis del cemento antes de que ocurra la reacción de estas con la sílice presente en los agregados. Luego, las puzolanas tienden a controlar y reducir la intensidad de las reacciones álcali-agregado en la masa del concreto (Kihara; Shukuzawa, 1982; Mehta; Monteiro, 1994; Souza, 1992).

Las puzolanas pueden reaccionar con parte de la CH presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con el consiguiente incremento de la impermeabilidad ante el ataque de agentes agresores (aguas sulfatadas, CO₂) y la resistencia mecánica (Kihara and Shukuzawa, 1982, Mehta and Monteiro, 1994, Zhang et al., 2000).

En general, puede afirmarse según han demostrado varios estudios, que las puzolanas han sido ampliamente utilizadas como sustitutos para el cemento en muchas aplicaciones debido a los beneficios económicos y ambientales, y sus propiedades ventajosas como la reducción de la permeabilidad, el aumento de la resistencia química y la mejora de las propiedades del hormigón fresco (Massazza, 1993, Ghrici et al., 2007).

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua/aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla (Alujas, 2010). Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la CH en la matriz, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en calcio (Ca)

y, para el caso de hormigones reforzados con acero, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Alujas, 2010).

1.3 Residuos de cerámica

La industria cerámica en su proceso de producción de revestimientos, ladrillos y azulejos, genera gran cantidad de residuos. Estos residuos cerámicos, generalmente, son inherentes de los procesos de quema y transporte dentro de la propia industria y cuando no son destinados al reciclaje, acarrearán pérdidas económicas y problemas ambientales (Lima, 2004).

Algunos trabajos plantean el reciclaje de esos residuos mezclando las materias primas naturales para la producción de cerámica. Otra forma de usar los residuos es como adición mineral a través de su molienda y tamizado. A partir de ahí, cuando se incorporan en morteros y concretos contribuyen a la resistencia mecánica, a través de las reacciones puzolánicas de metacaolinita residual con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Cordeiro et al., 2002).

1.3.1. Proceso de fabricación de productos cerámicos

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

1.3.2. Impacto ambiental

En la actualidad, la industria de cerámica es responsable de la creación de gran cantidad de residuos. La mayoría de las fábricas rechazan un gran volumen de material resultante del producto final, debido a los requisitos de calidad. Los materiales producidos presentan, con alguna frecuencia, pequeños defectos como el agrietamiento, que tornan el producto no comercializable.

Un pequeño número de industrias reintroduce parte del material defectuoso en la línea de producción o venden los desperdicios. Sin embargo, la cantidad de materiales reaprovechados en estas condiciones es poco significativa y la naturaleza y las

características adquiridas por los materiales cerámicos durante la cocción (sobre todo la dureza) dificultan su tratamiento (Lourenzo, 2014).

Existen varios aspectos que contribuyen al impacto ambiental del sector de la industria de cerámica, provenientes del proceso productivo. Pasan por el consumo de recursos naturales (materias primas, agua y energía), emisiones de gases, descargas de efluentes líquidos, producción de residuos y emisiones de ruido. En la Tabla 1.1 están representados los impactos ambientales más representativos asociados al proceso de fabricación de materiales cerámicos (Lourenzo, 2014).

Tabla 1.1. Aspectos ambientales significativos de la fabricación de materiales cerámicos

Proceso de fabricación	Consumos			Emisiones contaminantes				
	Materia prima	Agua	Energía	Emisiones gaseosas	Aguas residuales	Residuos	Ruido	Calor
Preparación de la pasta	x	x	x	x	x	x	x	
Moldeado		x	x		x	x	x	
Secado			x	x		x	x	x
Vidriado			x	x		x	x	
Cocción			x	x		x	x	x
Acabado		x	x		x	x	x	
Selección			x			x	x	
Embalaje	x		x	x		x	x	

Fuente: Lourenzo, 2014

1.3.3 Reutilización de los residuos de cerámica

Varios esfuerzos han sido desarrollados en el sentido de reaprovechar los residuos provenientes de la industria cerámica. La reintroducción de estos materiales en las líneas de producción comienza surgir en algunas empresas; sin embargo, gran parte de las industrias no tienen la capacidad para realizar este proceso, siendo considerable el volumen de residuos a dirigir y tratar (Lourenzo, 2014). Surgen en este ámbito, algunas investigaciones con el objetivo de valorar la viabilidad de la introducción de estos residuos

en diversos tipos de materiales de construcción para la obtención de cementos, morteros y placas de revestimiento.

(Ay and Unal, 2000) valoraron la posibilidad de incorporar residuos de azulejos en el cemento Pórtland, como puzolanas. El cemento fue sustituido en un 25, 30, 35 y 40 % por el residuo y fueron determinadas las propiedades puzolánicas, recurriendo a los ensayos de: estabilidad dimensional, granulometría, masa volumétrica, superficie específica y resistencia mecánica. Verificaron que hasta 35 % de sustitución del cemento, las mezclas cumplían los requisitos de la norma europea de especificación de los cementos NP EN 197-1:2012: Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad para cementos comunes. Caparica, Portugal.

(Puertas et al., 2006, Puertas et al., 2010, Puertas et al., 2008) estudiaron diversas mezclas crudas para la preparación de clínquer y de cemento con la incorporación de residuos de azulejos de cerámica roja y blanca. Realizaron la caracterización química y física de las muestras y verificaron que las mezclas cumplían los requisitos de la norma de especificación del producto correspondiente. En algunos casos, las mezclas estudiadas presentaban reactividades más elevadas que las de referencia. Los resultados obtenidos para la mezcla compuesta por los dos tipos de cerámica fueron bastante satisfactorios, lo que mostró la necesidad de unir estos residuos.

(Pacheco-Torgal and Jalali, 2010) analizaron la viabilidad de la sustitución parcial del cemento por residuos de cerámica de barro rojo y por cerámica blanca con diferentes tratamientos térmicos. Verificaron que la sustitución parcial de cemento por estos materiales mejora el comportamiento de los concretos a la resistencia a compresión, la capilaridad, la absorción del agua, la permeabilidad al aire y a la difusión de cloruros, contribuyendo a que los hormigones presenten una durabilidad bastante satisfactoria.

(Medina et al., 2012) analizaron la viabilidad de la sustitución del agregado grueso natural por el material reciclado de cerámica sanitaria, en la producción de concreto ecoeficiente. Usando porcentajes de sustitución del 15, 20 y 25 %, verificaron que la sustitución del agregado no solo interfiere en el proceso de hidratación, sino que también mejora la resistencia a compresión del hormigón. Por otro lado, fue observado que la microestructura en la interfase aglomerante-agregado era más compacta en el caso del concreto con agregado de cerámica. Los mismos escritores (Medina et al., 2013) determinaron la resistencia de este tipo de concreto a ciclos de hielo-deshielo, para los porcentajes de sustitución de 20 y 25 %, y observaron que el aumento de la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo era directamente proporcional al aumento de los porcentajes de la sustitución

de los agregados, teniendo de esta manera, una mejora representativa del comportamiento de los concretos.

1.3.4 Beneficios de utilización de los residuos de cerámica

El uso de residuos de cerámica en sustitución del aglomerante o del agregado en la producción de morteros permitirá obtener algunos beneficios económicos y ambientales como son (Lourenzo, 2014):

- La disminución de la producción de aglomerante, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂ y el consumo energético asociado.
- La reducción de la extracción de materias primas para la producción de aglomerantes y agregados y la consecuente reducción del impacto ambiental asociado a la excavación de taludes y lechos de los ríos.
- La reducción del uso de pinturas y otros productos de acabado similar al utilizado en morteros para el acabado de superficies.

La utilización de los residuos de cerámica en morteros de cal para reparación o la sustitución en edificios antiguos, puede también garantizar algunas ventajas técnicas:

- Los morteros deseados, con las cantidades adecuadas de residuos de cerámica, pueden presentar gran compatibilidad con los sistemas existentes, sobre todo cuando son comparados con los morteros hechos con cementos hidráulicos.
- Es posible obtener morteros con un desempeño mejorado gracias a morteros de cal aérea pura, con comportamiento hidráulico debido al potencial de reactividad puzolánica de los residuos de cerámica.
- Los residuos cerámicos pueden conferir a la microestructura de los morteros de cal aérea o de cal hidráulica natural (con baja hidraulicidad) características que mejoran su durabilidad, sobre todo en lo que respecta a la resistencia a la acción de las sales.

1.3.5 Polvo de ladrillo como puzolana

Los ladrillos de tierra y otros materiales cerámicos se han usado en mezcla de mortero desde la antigüedad. Aunque la química de la reacción puzolánica puede no haberse entendido antes del siglo XIX, la experiencia ha demostrado que la adición de ladrillos y azulejos en polvo para morteros puede proporcionar propiedades hidráulicas. No todos los ladrillos, sin embargo, tienen un potencial puzolánico. El proyecto Smeaton y otros estudios han sido fundamentales para el establecimiento de los parámetros en la actividad puzolánica del ladrillo con respecto a la temperatura de cocción y el tamaño de las partículas (Rogers, 2011). El proyecto Smeaton ha demostrado que el polvo de ladrillo con un tamaño

de partícula inferior a 75 micras tenía un mayor impacto en acelerar el tiempo de fraguado y la creación de una mayor resistencia en el mortero hidráulico. Además, el proyecto Smeaton determinó que los ladrillos disparados por debajo 950 °C tenían el efecto más positivo sobre la resistencia y durabilidad, pero no era concluyente si esto solo estaba relacionado con la temperatura de cocción o asociado con la composición mineralógica del ladrillo (Rogers, 2011). De hecho, la composición de la arcilla a partir de la cual se fabrica el ladrillo determinará la calidad y características de este, así como su potencial para actuar como una puzolana. Como regla general, las arcillas que contienen del 20-30 % de alúmina, del 50-60 % de sílice y el resto consiste en carbonato de magnesio, carbonato de calcio y óxido de hierro se consideran ideales para la fabricación de ladrillos (Rogers, 2011).

1.4 Cementos ternarios con arcillas calcinadas

Los cementos ternarios son aquellos que contienen tres materiales cementicios diferentes, de los cuales dos de ellos constituyen materiales cementicios suplementarios.

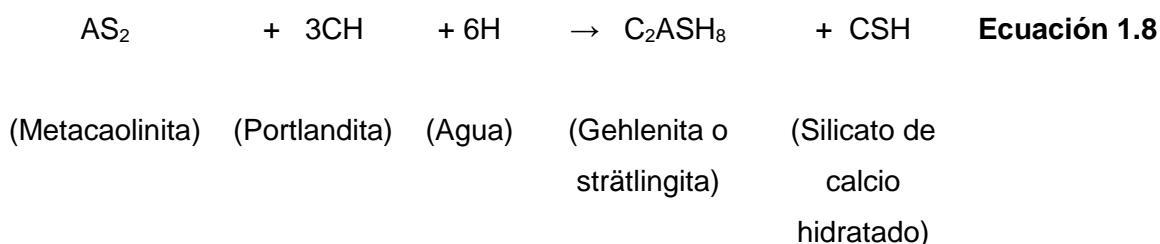
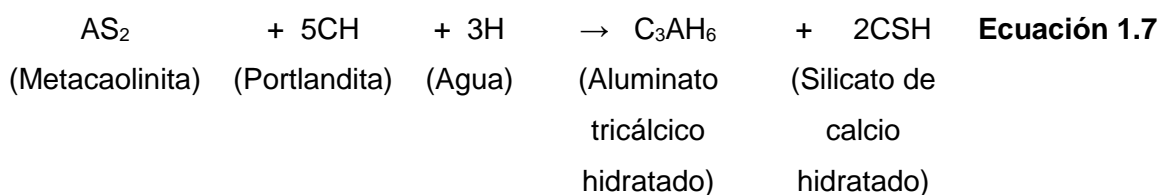
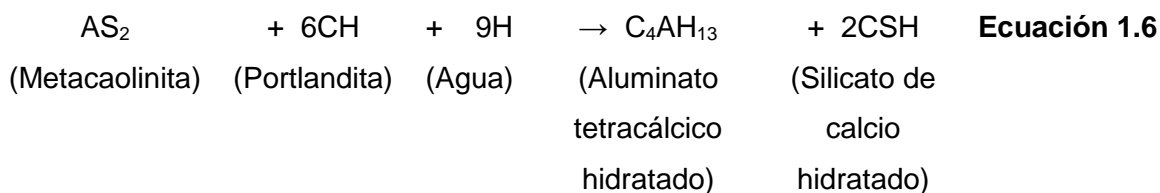
Las arcillas calcinadas que consisten en minerales de arcilla individuales como la caolinita, montmorillonita y la illita han estado en el foco de muchas investigaciones, ya que muestran reactividad puzolánica y pueden servir como tipo II adiciones al hormigón (Thienel et al., 2015). Los resultados obtenidos demuestran que la caolinita, resulta ser la más activa una vez sometida a tratamiento térmico, seguida por las montmorillonitas, aunque esta última requiere de temperaturas de calcinación más elevadas; el bajo rendimiento de la illita limita su empleo como puzolana (Ambroise et al., 1985, He et al., 2000, Fernández et al., 2011). Por eso, las arcillas caoliníticas calcinadas (metacaolinita) poseen actualmente mayor potencial de trabajo y por consiguiente, han sido las más estudiadas.

Otra posibilidad de obtención de la arcilla calcinada es a partir de residuos de industrias que utilizan arcilla como materia prima, así ocurre en la industria cerámica. Las arcillas utilizadas en la producción de ladrillos y tejas de cerámica roja pasan por un proceso de quema y sinterización, alcanzando una temperatura de aproximadamente 900 °C. Variables importantes en la validez del potencial de los residuos cerámicos son el tipo de arcilla utilizada y su proceso de producción, ya que determinan el nivel de actividad puzolánica del residuo generado, debido a que el tipo de arcilla empleada es importante, pues define las composiciones químicas y mineralógicas de los residuos. Con relación al método de producción: la temperatura de calcinación, el tiempo de residencia y la uniformidad de la temperatura en el interior de los hornos pueden afectar significativamente las características de los residuos (Gongalves et al., 2006).

1.4.1 Hidratación de pastas de cemento Pórtland-arcilla calcinada

Dentro de las arcillas calcinadas, el metacaolín (MK) es el material puzolánico más extensamente estudiado y el único que existe en el mercado como un producto comercializable.

Cuando se agregan arcillas calcinadas en forma de metacaolín al cemento se produce la interacción entre los aluminosilicatos (AS_2) suministrados por el metacaolín y la portlandita liberada durante la hidratación de los silicatos de calcio (Ecuación 1.6 -1.8) (Vizcaíno, 2014):



En una pasta de cemento completamente hidratada el CH ocupa entre el 20-25 % del volumen de sólidos y su único aporte se limita a la contribución en el mantenimiento del pH que evita la corrosión del acero de refuerzo en hormigones armados (Hewlett et al., 2004). La reacción del CH con la alúmina y la sílice proveída por la arcilla calcinada incrementa el volumen de sólidos en la matriz cementicia a través de la formación adicional de compuestos del tipo CSH, además de otras fases estables como la strätlingita, lo cual provoca menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Vizcaíno, 2014). Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Pórtland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración del ion cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos (Bai et al., 2003, Al-Akhras, 2006, Justice, 2005, Sabir et al., 2001, Talero, 2005, Gongalves et al., 2009).

1.4.2 Eficiencia de las arcillas calcinadas en pastas de cemento Pórtland

Diversos autores refieren que la eficiencia de las arcillas calcinadas en relación con la generación de productos hidratados adicionales se encuentra en función de la disponibilidad de hidróxido de calcio presente en la mezcla (proporción de sustitución) y de las características de la puzolana (actividad puzolánica). Esta eficiencia influye en las propiedades mecánicas y en la estructura de poros de los materiales cementicios, y consecuentemente, en la durabilidad de los mismos (Poon et al., 2001, Frías, 2000, Gongalves, 2005).

En este sentido, Gongalves, 2005 en su estudio sobre pastas de cemento Pórtland-arcilla calcinada reporta que de los contenidos de sustitución del 10-40 % para la metacaolinita (MK) y los residuos de la producción de ladrillos cerámicos (RC), la que condujo a la generación del mayor volumen de hidratos para la MK fue de un 20 %, mientras que para los RC fue de un 10 %. Esto demostró, según los ensayos realizados, que la presencia de arcilla calcinada como sustituto parcial del cemento promueve un mayor refinamiento de la estructura de poros de los concretos, aumentando así la resistencia a la penetración de agua y agentes agresivos, como los iones cloruros y los sulfatos, lo que reduce a su vez la probabilidad de deterioro del material y permite un aumento del tiempo de vida útil.

Adicionalmente, la eficacia de la arcilla calcinada depende de las propiedades físicas y químicas del producto final. La distribución del tamaño de las partículas es un efecto físico importante, ya que la arcilla calcinada fina dispersa puede servir como núcleo, mejorando así la hidratación temprana de los sistemas cementantes (Fernández et al., 2011, He et al., 1995).

De manera general, el desempeño de las arcillas calcinadas en pastas de cemento Pórtland depende de factores tales como: la composición química, el índice de actividad puzolánica, la proporción de sustitución, la granulometría, la forma y masa específica del material puzolánico, la proporción de los materiales, la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la edad y el grado de hidratación (Gongalves, 2005).

1.5 Cemento de bajo carbono (LC3)

El “Cemento de Bajo Carbono” (LC3) constituye una formulación novedosa de cemento desarrollada por el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) en la EPFL, Suiza, y el CIDEM en Cuba desde el año 2009. Esta investigación colaborativa ha demostrado el potencial de mezclas ternarias de piedra caliza, arcilla calcinada y clínquer, a la que nombran LC3, para dar un buen rendimiento en el contenido de clínquer (50 % o menos), componente más costoso del producto a partir de su alto consumo energético (Antoni et al.,

2012). En estos sistemas se aprovecha la sinergia producida entre los aluminatos y carbonatos, que permite aumentar el nivel de sustitución de clínquer sin comprometer las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad del nuevo cemento (Vizcaíno, 2014).

La viabilidad de la producción del LC3 ha sido comprobada mediante una prueba industrial en la fábrica de cemento Siguaney en Sancti Spíritus, así como en estudios de costos e impacto ambiental. La prueba industrial se inició en el mes de marzo del 2013, con la quema industrial de 120 ton de arcilla caolinítica del yacimiento de Pontezuela, en Camagüey que generaron más de 65 ton de metacaolín evaluadas dentro de los valores esperados. Con la molienda realizada se culminó la fase de producción industrial del nuevo cemento y comenzó la de prueba experimental en una amplia gama de aplicaciones, que actualmente incluye la producción de bloques, elementos prefabricados, baldosas hidráulicas y otras obras de albañilería (Pérez, 2015). A la experiencia de producción y aplicación del LC3 se unen la India, segundo productor mundial de cemento, Brasil y Tailandia, lo cual avala al LC3 como una tecnología simple y asequible para todos los productores y países (Vizcaíno, 2014, Scrivener, 2014).

El cemento producido ha mostrado excelentes propiedades hasta el momento. En pruebas de resistencia a las 24 horas alcanzó 5 MPa, el 15 % de la resistencia que se espera alcance en 28 días. No incrementa la demanda de agua, y tiene un fraguado normal, similar a los cementos comerciales P-35 y PP-25. Esta nueva tecnología permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínquer que logra la industria de cemento en Cuba (alrededor del 15-18 % en el cemento PP-25), para producir un cemento de similar resistencia y con una sorprendente firmeza a la penetración de cloruros en ambientes agresivos (Pérez, 2015). Unido a esto se le suman importantes ventajas en su tecnología como son: gastos de producción más baratos o similares, puede realizarse su fabricación usando los equipos existentes en una planta de cemento y no necesita ningún cambio importante en la tecnología del hormigón, lo que contribuye significativamente en el eficiente uso de recursos (Scrivener, 2014).

Los estudios económicos realizados demuestran que el LC3 podría resultar hasta un 15 % más barato que los cementos producidos hoy en el país, a lo cual se une su efecto medioambiental, a partir de que la sustitución de clínquer permite reducciones en las emisiones de CO₂ a la atmósfera entre un 25-35 % con respecto a la práctica diaria (Vizcaíno, 2014). Adicionalmente, constituye una opción prometedora en aras de aumentar la oferta, sobre todo en países tropicales y subtropicales, donde el aumento de la demanda será la más alta en las próximas décadas (Scrivener, 2014).

1.5.1 Producción local de cemento LC3

Con la experiencia adquirida en la producción industrial del cemento de bajo carbono, Cuba se pone en la punta de los países que buscan alternativas ecológicas para la producción de materiales de construcción y en este sentido el CIDEM ha demostrado la posibilidad de aumentar la producción del LC3 pero esta vez de manera local. En esta forma de producción los componentes mezclados resultan de la combinación de un 50 % de cemento P-35, 30 % de arcilla calcinada obtenida a partir de la trituración de piezas de cerámicas roja (ladrillos, tejas, tubos, rasillas) y un 20 % de caliza sin calcinar. La sinergia que ocurre entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y con menos clínquer poder brindar mayor resistencia (Castillo, 2010). Tanto la caliza como la arcilla calcinada deben presentar los requisitos exigidos para su utilización en la producción de este cemento, poseer una humedad inferior al 9 % y después de molidas una finura menor o igual al 10 % retenido en el tamiz de 90 μm ya que esta propiedad contribuye al aumento de la resistencia mecánica. Las arcillas calcinadas obtenidas de la quema de piezas de cerámica roja en hornos artesanales deben alcanzar temperaturas entre 700-900 °C y con la mayor pureza posible para lograr una adecuada reactividad puzolánica. La caliza no debe presentar terrones de arcilla y su componente principal debe ser el carbonato de calcio (Martirena et al., 2015).

La producción local de cemento de bajo carbono puede realizarse en talleres artesanales que posean la infraestructura y las maquinarias adecuadas para almacenar las materias primas, monitorear sistemáticamente la producción del cemento y guardarlo de forma segura para su posterior distribución (Martirena et al., 2015). Esta experiencia en la fabricación del cemento ecológico LC3 a pequeña escala, fue asumida por primera vez en Cuba por el cuentapropista santaclareño Pedro Enríquez Pérez Rodríguez y posteriormente transmitida a la minindustria de Manicaragua, para obtener más surtidos y ofertarlos a precios asequibles, ambos con el asesoramiento del CIDEM (Zerquera, 2015).

La mezcla y el molido de las materias primas se realiza generalmente en molinos de bolas de operación discontinua y carga manual como son el MB-600 y MB-800, donde el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación este se abre para separar el mineral de los cuerpos molturantes. También pueden emplearse molinos de bolas de operación continua tales como el CR 94 y el molino Ricote, donde estos se alimentan de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo. Estos molinos permiten homogenizar y triturar el material hasta convertirlo en polvo fino (Martirena et al., 2015). En una entrevista realizada el 21 de

marzo del 2015 al doctor José Fernando Martirena, director del CIDEM, este se refirió a la existencia de 39 molinos en Cuba, que de procesar el cemento ecológico, pudieran obtenerse diariamente 250 toneladas del producto y contribuir a su generalización en el país (Zerquera, 2015).

Las principales aplicaciones del LC3 producido localmente están encaminadas a la producción de bloques de hormigón, baldosas hidráulicas, celosías y otros elementos prefabricados menores; la utilización en la elaboración de morteros de albañilería y la fabricación de hormigón no estructural de baja resistencia (15-20 MPa) para pisos, columnas, cerramientos. Esta forma de producción genera numerosas ventajas como son: el aprovechamiento de fuentes locales de materias primas, fundamentalmente desechos de la producción agroindustrial; oportunidades para el empleo de fuerza de trabajo de poca calificación; bajo índice de consumo de energía en la producción del aglomerante; producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales y grandes ciudades; bajos costos de producción en comparación con el cemento Pórtland y el comercio local del producto con el objetivo de disminuir el costo de transportación (Martirena et al., 2015).

1.6. Normas de cementos mezclados

El establecimiento de normas favorece en todo momento el progreso técnico, el desarrollo económico y el aumento de la calidad de vida. Actualmente, la normalización ha tendido a modificarse como consecuencia de la necesidad de adaptarse a la innovación y procurar especificaciones uniformes que permitan atender convenios de comercio internacional (Godoy, 2006).

1.6.1 Normativas europeas

El Comité Europeo de Normalización (CEN), constituye una Asociación de los Organismos Nacionales de Normalización de 19 países europeos. Las actividades ejecutadas por el CEN, son supervisadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), única entidad reconocida como responsable de la elaboración de las normas en este país UNE (Una Norma Española).

Dentro de la normativa más recientemente aprobada en España, cabe destacar la aparición de nuevas adiciones como la puzolana natural calcinada, cenizas volantes calcáreas y esquisto calcinado, introduciendo de igual forma en los CEM II, cementos Pórtland con adición, dos porcentajes de sustitución, A de 6-20 % y B de 21-35 %, siempre para todas las adiciones admitidas, excepto para el humo de sílice en el que solo es permitido un nivel

de adición A del 6-10 %. También se establece un nivel de adición de escoria de alto horno en el cemento del 81-95 %, introduciéndose el cemento V/B con un porcentaje de adición de escorias del 31-50 %, y del 31-50 % de la suma de puzolana natural, puzolana calcinada y ceniza volante silíceas (Godoy, 2006).

En octubre de 2006 el Comité Técnico 51 del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 51) decidió investigar la incorporación por primera vez en las normativas, de la producción de cementos ternarios. El reporte final fue presentado en marzo de 2012 y sobre la base de los resultados positivos obtenidos, el CEN/TC 51 estableció los límites de sustitución de cada componente y la clasificación de estos nuevos cementos para su inclusión en la norma UNE 197-1:2011, en octubre de 2013 (Delort, 2013). La UNE 197-1:2011, considera 5 categorías de cemento, dentro de las cuales, el cemento Pórtland ordinario CEM I constituyó solo el 32 % de la producción en Europa según datos de 2004 de Cembureau, mientras que el cemento con adiciones CEM II fue el más producido con el 55 % de la producción. El resto de las clases de cementos mezclados CEM III, CEM IV y CEM V son fabricadas para propósitos específicos, por lo que su consumo se considera bajo (Vizcaíno, 2014).

Según Delort, 2013 como los cementos ternarios de bajo contenido de clínquer han sido desarrollados para la producción de hormigones estructurales más sostenibles, podrían estar incluidos dentro de la categoría CEM II; sin embargo, esta clasificación considera cementos donde el clínquer es el componente mayoritario. Por ello se prevé que en la nueva adecuación de la norma europea, sea introducido un subgrupo CEM II/C para el contenido de clínquer comprendido en el rango 50-64 %; pero un nuevo tipo de cemento CEM VI debe ser definido para cubrir el subgrupo con contenido de clínquer entre 35 y 49 %. El enfoque de la CEN/TC 51 permite la incorporación de otros productos innovadores en las normas europeas, como es el caso de la combinación clínquer-arcilla calcinada-caliza para dar lugar a un CEM II/C-M (Q-L/LL) (Vizcaíno, 2014).

Actualmente, la mayoría de países europeos centralizan la normalización de cementos en las Normas Españolas UNE, apegándose con ello a todo lo referente a terminología, requisitos, métodos de ensayo y generalidades contenidas dentro de estas, dentro de las cuales pueden ser mencionadas (Godoy, 2006):

- Norma UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Esta norma presenta cinco clasificaciones:

Tipo I: CEM I: Cemento Pórtland.

Tipo II: CEM II: Cemento Pórtland con adiciones.

Tipo III: CEM III: Cemento Pórtland con escorias de alto horno.

Tipo IV: CEM IV: Cemento puzolánico.

Tipo V: CEM V: Cemento compuesto.

Estos cementos pueden presentar adiciones de escoria de alto horno (S), humo de sílice (D), puzolana natural (P), puzolana natural calcinada (Q), ceniza volante silíceas (V), ceniza volante calcárea (W), esquisto calcinado (T), caliza L (L) y caliza LL (LL).

- Norma UNE-EN 97-1:2000/A1:2005 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes (inclusión de cementos de bajo calor de hidratación).
- Norma UNE-EN 197-4:2005 Cemento. Parte 4: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos con escoria de horno alto y baja resistencia inicial.
- Norma UNE 80303-1:2001: Cementos con características adicionales. Parte 1: cementos resistentes a los sulfatos.
- Norma UNE 80303-2:2001: Cementos con características adicionales. Parte 2: cementos resistentes al agua de mar.
- Norma UNE 80303-3:2001: Cementos con características adicionales. Parte 2: cementos de bajo calor de hidratación.

Otros países han incorporado en sus normas este tipo de cemento o establecido especificaciones especiales, como el caso de la Norma India IS 1727-1967. En este mismo sentido, en Japón se establece la Norma JIS R 5210 para cemento Pórtland ordinario y Pórtland con un máximo de adición del 5 %.

1.6.2 Normas regionales (Norte, Centro y Sur América)

❖ Norte América:

Dentro de las Normas establecidas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en Estados Unidos, se encuentra la ASTM C-595, en la cual se contemplan especificaciones básicas para seis tipos de cementos mezclados: IS, IP, P, I (PM), I (SM) y S; destinados a usos generales en la construcción, determinándose en ella la calidad y tipo de materiales a emplear para el también establecido proceso de elaboración.

Por su parte, México cuenta con la Norma Mexicana NMX - C - 414 - ONNCCE - 1999, Industria de la construcción - cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba, establecida por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y edificación, que regula los rangos de los componentes que forman los cementos Pórtland puzolánicos, diseñados estos especialmente para la construcción sobre

suelos salinos además de presentar un excelente comportamiento en obras expuestas a ambientes químicamente agresivos. De igual forma se encuentra vigente la Norma NMX-C-273-ONNCCE, Determinación de la actividad hidráulica de las adiciones con cemento Pórtland.

❖ Sur América:

El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), fundado en 1935, constituye el Primer Instituto de Normas de Latinoamérica. En 1999, se realiza una revisión de las Normas IRAM y son creados dos nuevos documentos en los que se resume toda la información técnica contenida en trece normas.

- Norma IRAM 50000:2000 - Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción, en la que se contemplan los componentes de los cementos para uso general basados en clínquer de cemento Pórtland, así como las proporciones en que deben ser combinados para producir una serie de tipos y clases de cemento, incluyendo también sus exigencias mecánicas, físicas y químicas además de sus condiciones de recepción.
- Norma IRAM 50001:2000 - Cemento. Cemento con propiedades especiales en la que se especifican los requisitos que deben cumplir este tipo de cementos para su empleo en aplicaciones de características particulares.

En Perú, el Comité Técnico de Normalización de Cementos y Cales, utilizó como antecedente la norma ASTM C-595 para la elaboración de la Norma Técnica Peruana NTP 334.090:2001, en la cual se establecen los requisitos que deben cumplir los cementos Pórtland mezclados de uso general en la construcción. Las normas nacionales sobre cemento comprende la Norma NTP 334.009 que contempla los cinco tipos de cemento Pórtland, las Normas NTP 334.044 y la NTP 334.049 sobre cementos Pórtland puzolánico y Pórtland de escoria respectivamente, así como la Norma NTP 334.073 del cemento Pórtland compuesto y la Norma NTP 334.082 sobre cemento Pórtland adicionado.

La Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), creada en 1958, establece la Norma COVENIN 3134-04, Cemento Pórtland con adiciones, la Norma Obligatoria COVENIN 0935-04, Especificaciones para cementos Pórtland con escoria, y la Norma COVENIN 0028-93, Cemento Pórtland especificaciones.

La Norma Chilena NCh 148 Of68, establecida por el Instituto Nacional de Normalización (INN), especifica una clasificación de cementos de acuerdo a los componentes, clasificándolos en cementos Pórtland al estar compuestos únicamente por clínquer con bajo porcentaje de yeso; cementos Pórtland siderúrgicos al contener éstos clínquer, escoria en

un porcentaje menor al 30 % y yeso; cementos siderúrgicos, cuando la escoria de alto horno está presente en porcentajes comprendidos entre 30 y 75 %, y por último; cementos puzolánicos, cuando el porcentaje de puzolana está entre 30 y 50 %.

En Colombia, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), ha establecido las especificaciones de calidad en muchos casos adaptadas de los estándares de la ASTM. En este sentido, las normas NTC 121 y NTC 321 establecen las propiedades físicas, mecánicas y especificaciones químicas de los cementos Pórtland, mientras las normas NTC 30 y 31 clasifican y definen los tipos de cementos. Las normas colombianas, NTC, contemplan la posibilidad de añadirle al cemento Pórtland otros materiales y productos de adición, además del clínquer y el yeso, siempre que éstos no afecten las propiedades del cemento resultante.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), establece la Norma INEN 490 basada en la Norma ASTM C-595, en la que se dictan los requisitos y especificaciones para los cementos Pórtland compuestos, o bien, aquellos constituidos con un componente adicional de tipo mineral con potencial hidráulico, como el caso de la puzolana y la escoria.

El Instituto Uruguayo de Normas Técnicas fundado en 1939, establece la Norma UNIT 1024 para cemento Pórtland de bajo calor de hidratación y UNIT 326 para la determinación del calor de hidratación, contemplándose de igual forma la norma UNIT 1046 para cementos compuestos, dentro de la cual se especifican definiciones y requisitos, así como las Normas UNIT 1038, UNIT 1039 y UNIT 1047 cuyo contenido contempla especificaciones y ensayos para materiales puzolánicos a emplear en la fabricación de cemento.

La Asociación Brasileña de Normas Técnicas, ABNT, fundada en 1940, está integrada por varios Comités Técnicos de Normalización entre los que se encuentra el Comité ABNT/CB-02 encargado de la Normalización del área de la construcción civil, el cual establece las Normas NBR 5732: Cemento Pórtland común, NBR 5735: Cemento Pórtland de alto horno, Norma: NBR 5736 Cemento puzolánico y Norma NBR 11578: Cemento Pórtland compuesto.

❖ Centro América:

En 1994 el Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), establece la Norma Obligatoria NSO 91.13.01.03 basada en la experiencia de las normas técnicas mexicanas y americanas ASTM, en la que se dictan especificaciones para el cemento Pórtland, comprendiendo propiedades físicas y especiales.

Por su parte, en Costa Rica el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC), ha establecido la Norma NCR 40:1990, Norma para Cementos Hidráulicos, en la que se

incluyen definiciones tanto de los cementos Pórtland, cementos Pórtland puzolánicos, cementos Pórtland modificados con puzolana y cementos Pórtland modificados con caliza, así como de los componentes, estableciendo la clasificación del material de acuerdo a especificaciones y tipos.

La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 12 006 – 03: Fabricación, uso y manejo del cemento, preparada por el Comité Técnico de la Construcción de la Comisión Técnica de Normalización y Calidad, establece los requisitos químicos, físicos y de desempeño de los cementos, así como los requerimientos para el empaque, transporte, almacenamiento y uso de los mismos. Esta norma aplica a todos los cementos comercializados en aquella nación bajo las Normas ASTM C-91, ASTM C-150 (*Standard Specification for Portland Cement*) y ASTM C-595.

Actualmente en Honduras no se encuentra establecida norma alguna por parte de una entidad nacional que dicte especificaciones estándar del cemento, desarrollándose una producción apegada a las Norma ASTM C-595.

En Cuba, la Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización del país. La preparación de las Normas Cubanas se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización (NC/CTN). La norma NC 96: 2011. Cemento con adición activa. Especificaciones, elaboradas por el NC/CTN 22 es la que establece las especificaciones, clasificación y designación que deben cumplir los cementos con adición que se utilicen en trabajos de construcción. En esta norma se plantea que el producto se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo al % de adición y la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en kgf/cm².

Cemento Portland Puzolánico:

a) Cemento Pórtland Puzolánico 25 (con un % adición activa natural entre 6 y 20 %):
Cemento PP-25.

b) Cemento Pórtland Puzolánico 35 (con un % adición activa natural entre 6 y 20 %):
Cemento PP-35.

Cemento Puzolánico:

a) Cemento Pórtland (con un % de adición activa natural entre 21 y 35 %): Cemento PZ-25.

1.7 Técnicas y métodos de ensayo

1.7.1 Ensayos que se le realizan al cemento según las normas cubanas

La consistencia normal radica en determinar la cantidad de agua requerida para preparar la pasta de cemento hidráulico a ensayar mediante la aguja de Vicat, esta se determina por la NC 524: 2007, al igual que los tiempos de fraguado inicial y final.

El ensayo de estabilidad de volumen se determina según la norma cubana NC 504: 2013, observando la expansión volumétrica de la pasta de cemento de consistencia normal, indicada por el desplazamiento relativo de dos agujas en el aparato de Le Chatelier.

Los ensayos de resistencias a compresión y flexión del mortero de cemento se determinan a partir del método descrito en la NC 506: 2007.

Los métodos de ensayo para realizar el análisis químico de los cementos: pérdida por ignición, óxido de magnesio y trióxido de azufre se describen en la NC 507: 2007.

En la norma NC 980:2013 se describe el método de tamizado para determinar la finura del cemento y el método de permeabilidad al aire (Blaine) para definir la superficie específica.

1.7.2 Otros Ensayos

Existen otros ensayos como la calorimetría isotérmica y el minicono que se realizan para evaluar los cambios y propiedades en pastas de cemento.

El método de Calorimetría Isotérmica puede ser empleado para el seguimiento continuo de la reacción de hidratación en pastas de cemento y se basa en la medición de la velocidad de liberación de calor en función del tiempo, bajo un régimen isotérmico (Alujas, 2010). Esta técnica toma en cuenta además de los incrementos en temperatura, la potencia consumida para lograr el incremento de temperatura (Sandberg, 2003). En este ensayo es factible utilizar en la confección de las pastas Ca (OH)₂- Puzolana el protocolo R3.

El procedimiento de ensayo del Minicono para la determinación de la plasticidad, su variación en el tiempo y la reducción de agua de las pastas de cemento con la introducción o no de aditivos químicos y adiciones, así como el control de cemento con diferentes composiciones mineralógicas, se establece en la norma NC 235: 2013 Pastas de cemento. Determinación de la plasticidad y su variación en el tiempo por el método del minicono.

1.8. Conclusiones parciales del capítulo

- Los materiales puzolánicos constituyen las principales adiciones empleadas para la elaboración de cementos mezclados contribuyendo a mejorar las propiedades físico-mecánicas en morteros en cuanto a impermeabilidad, resistencia y durabilidad.
- En el contexto internacional, el aprovechamiento de los residuos cerámicos debido a su carácter puzolánico constituye una opción atractiva como fuente de materiales de construcción para la obtención de cementos y morteros, debido a su amplia disponibilidad y los beneficios técnicos y ambientales que genera.
- La producción local de cemento LC3 constituye una opción alternativa para incrementar los volúmenes de producción de cemento necesarios para mitigar la creciente demanda nacional y de esa forma disminuir el impacto ambiental y energético que genera la producción industrial.
- A pesar de que las normativas nacionales e internacionales acerca de los cementos mezclados establecen las especificaciones de adición y el porcentaje de sustitución que deben cumplir estos cementos, se hace necesario realizar adaptaciones que permitan la evaluación de nuevas formulaciones de cementos ternarios de bajo contenido de clínquer.

CAPÍTULO 2: Elaboración de cementos mezclados con residuos de cerámica roja y caliza

2.1 Generalidades

En este capítulo se exponen las características de los materiales que se emplearon para la fabricación a escala de laboratorio de los cementos con un 50% de sustitución de cemento P-35 por una mezcla de polvo de residuos de ladrillos y caliza (LC3-50 L) o polvo de residuos de rasillas y caliza (LC3-50 R), en proporción 2:1, así como los ensayos físico-mecánicos y químicos que se le realizaron a dichos cementos para comprobar su cumplimiento con las especificaciones de la *NC 96: 2011 Cemento con adición activa. Especificaciones*. Además, se fabricaron morteros tipo III según *NC 175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones*, con ambos aglomerantes producidos, empleando arena de la cantera Mariano Pérez Valí (El Purio) y con adición de cal. Como resultado de estas combinaciones se obtuvieron 3 diseños de mezclas que incluye una mezcla con cemento PP-25 empleada como referencia.

2.2 Diseño de Experimento

El diseño unifactorial realizado está sustentado en la evaluación del comportamiento de los cementos con un 50 % de sustitución de cemento P-35 por una mezcla de polvo de residuos de ladrillos y caliza o polvo de residuos de rasillas y caliza, en proporción 2:1, como aglomerante para morteros de albañilería. Para ello se siguió la siguiente metodología:

- Selección y procesamiento de las materias primas utilizadas en la elaboración de los cementos y morteros a elaborar.
- Caracterización del cemento P-35, polvo de residuos de ladrillos, polvo de residuos de rasillas, caliza, cal y arena empleados como materias primas.
- Obtención a escala de laboratorio de dos cementos con un 50 % de sustitución de cemento P-35 por una mezcla de polvo de residuos de ladrillos-caliza o polvo de residuos de rasillas-caliza, en proporción 2:1 para la realización de los ensayos:
 - ✓ Consistencia Normal (%)
 - ✓ Tiempo de Fraguado Inicial (min)
 - ✓ Tiempo de Fraguado Final (h)
 - ✓ Finura de molido (% pasado tamiz 90 μ m)
 - ✓ Superficie específica Blaine (cm²/g)
 - ✓ Peso Específico real (g/cm²)

- ✓ Estabilidad de volumen por Le Chatelier (mm)
- ✓ Ensayos químicos
- ✓ Resistencia mecánica a la flexión y compresión a los 3, 7 y 28 días con arena normalizada.
- Fabricación de morteros de colocación y revestimientos tipo III atendiendo a las dosificaciones de la NC 175:2002 fijando una fluidez determinada con la arena de El Purio.
- Producción de briquetas prismáticas de mortero de 160 x 40 x 40 mm, y realización de los ensayos:
 - ✓ Resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días con arena del Purio.
 - ✓ Absorción de agua por capilaridad a la edad de 28 días.
- Evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos.

Declaración de las variables:

La metodología a utilizar consistió en la confección de 2 cementos y la realización de una serie de ensayos mediante los cuales se determinaron sus principales propiedades y la de los morteros elaborados con ellos.

Previamente a la determinación de las propiedades de los cementos y morteros se caracterizaron los componentes que los constituyen, tales como los polvos de cerámica roja, polvo de caliza, áridos y la cal.

Debido al número de mezclas y la necesidad de obtención de los cementos y del mortero, el programa experimental se dividió en dos etapas:

La primera de ellas consistió en la elaboración de los cementos con 50 % de sustitución de cemento P-35 por polvo de rasilla o de ladrillo y caliza, en proporción 2:1, los cuales fueron caracterizados de acuerdo a la norma cubana *NC 96:2011 Cemento con adición activa. Especificaciones*. Se realizaron ensayos de consistencia normal, tiempo de fraguado, expansión, finura, peso específico, calorimetría, así como resistencia mecánica a los 3, 7 y 28 días.

La segunda etapa correspondió a la realización de ensayos que permitieron determinar propiedades físico-mecánicas de los morteros elaborados con los aglomerantes producidos, así como la capacidad de absorción y la resistencia mecánica a los 3, 7 y 28 días, según la norma cubana *NC 175:2002 Morteros de albañilería. Especificaciones*.

Para la realización del diseño de experimento se definieron las variables independientes de los cementos LC3-50 L (2:1), LC3-50 R (2:1) en correspondencia con los factores que intervienen y los niveles de variación de estos: Polvos de cerámica roja, con 2 niveles de

variación (rasilla de Santa Clara y ladrillo de Vueltas), caliza con 1 nivel de variación y relación de sustitución con 1 nivel de variación (2:1).

Las propiedades de los cementos y morteros elaborados fueron declaradas como las variables dependientes, entre las que se encuentran: la reactividad puzolánica, la consistencia, la resistencia mecánica a flexo-compresión, la absorción de agua por capilaridad.

2.3 Selección y caracterización de las materias primas

Los materiales empleados para la elaboración de los cementos fueron el cemento P-35 obtenido de la Fábrica de Cemento de Siguaney, los residuos de ladrillos seleccionados en el Tejar Fortuna de Sagua la Chica, los residuos de rasillas adquiridos en el Taller de Pedrito y la caliza procedente de la cantera el Purio.

Se realizó la caracterización de los cementos [LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1)] que constituyen la materia prima fundamental. Estos cementos, junto con la arena del Purio, en Encrucijada, y la cal proveniente de la cantera de Palenque, dieron como resultado los morteros evaluados.

2.3.1 Polvos de residuos de cerámica

El residuo cerámico utilizado como material puzolánico en el presente estudio fue obtenido de dos materiales diferentes. El primero fue residuos de ladrillos de barro, proveniente del Tejar Fortuna de Sagua la Chica, ubicado en el municipio de Camajuaní perteneciente a la provincia de Villa Clara. El segundo fue residuos de rasillas de barro proveniente del Taller de Pedrito situado en la Carretera Acueducto, Reparto Sakenaf en el municipio de Santa Clara, provincia de Villa Clara.

Los desechos de ambos productos cerámicos consistían en fragmentos con dimensiones variadas y fueron seleccionados cuidando que no estuvieran mezclados o contaminados con desechos de otros materiales.

Para su caracterización y posible utilización como material puzolánico fue necesario que los mismos se sometieran a un proceso de molienda desarrollado en la Agrupación Constructora #10 ubicada en la Carretera la Quinta Km 1, en el municipio de Camajuaní. Para lograr dicho proceso adecuadamente se garantizó que las chamotas de rasillas y ladrillo estuvieran limpias de residuos de otros materiales y con el menor contenido de humedad posible. En el proceso de fabricación se llevó a cabo el siguiente orden de actividades:

1. Trituración de los residuos de ladrillo/rasilla en un molino de martillo de fabricación criolla (para disminuir su tamaño).
2. Llenado del molino de bolas MB-600 con las chamotas de ladrillos/rasillas.
3. Molienda del material en un molino de bolas, durante 45 minutos.
4. Almacenamiento del material molido, garantizando las condiciones adecuadas para su conservación.

2.3.2 Caliza

La caliza empleada en la producción de los cementos fue proveniente de la cantera Mariano Pérez Valí, conocida como El Purio, ubicada en la Finca La Caridad al Sur del CAI Perucho Figueredo a 30 Km al Norte de Santa Clara en el municipio de Encrucijada, provincia de Villa Clara. Esta fue sometida al mismo proceso de molienda que los residuos cerámicos, descrito en el epígrafe 2.3.1.

2.3.3 Cemento P-35

El cemento P-35 fue proveniente de la fábrica de cemento Siguaney situada en la provincia de Sancti Spíritus y su caracterización se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Caracterización del cemento P-35

Ensayos	Unidad	P-35
Consistencia normal	%	24,2
Tiempo de fraguado inicial	min	112
Tiempo de fraguado final	h	3:45
Finura de molido	%	3,7
Peso específico real	g/cm ³	3,0
Superficie específica (Blaine)	cm ² /g	3075
Resistencia a compresión 3 días	MPa	25,8
Resistencia a flexión 3 días		6,9
Resistencia a compresión 7 días		35,5
Resistencia a flexión 7 días		8,6
Resistencia a compresión 28 días		42,4
Resistencia a flexión 28 días		9,5

Fuente: Elaborado por la autora

2.3.4 Árido normalizado

La arena sílice normalizada fue procedente del yacimiento de Siguaneá localizado en la Isla de la Juventud y se empleó en la elaboración de los morteros para evaluar la resistencia mecánica de los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1).

Este compuesto se encuentra constituido por la mezcla de cuatro fracciones de una arena lavada, no molida, de forma aproximadamente redondeada, cuya composición química y granulométrica cumple las especificaciones de la *NC 54-396:87 Arena sílice normalizada para ensayos de cemento. Especificaciones de calidad*. Estas arenas se rigen por índices de calidad químicos y físicos. En la Tabla 2.2 se muestra la granulometría del árido normalizado.

Tabla 2.2: *Granulometría del árido normalizado*

Grano No.	% Retenido	Peso (g)
1	Tamiz 2 mm	450
2	Tamiz 1 mm	460
3	Tamiz 0,5 mm	270
4	Tamiz 0,15 mm	175

Fuente: *Elaborado por la autora*

2.3.5 Árido triturado

Para la elaboración de los morteros se empleó arena procedente del Purio y la caracterización de esta se realizó en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Villa Clara, según los requisitos exigidos en la norma cubana NC 175: 2002 Morteros de albañilería. Especificaciones. Inicialmente se efectuó el cuarteo del material tomando varias muestras de 45 kg para cada ensayo de caracterización y en la preparación del árido para la mezcla fue necesario tamizar por la malla No. 4. En las Tablas 2.3 y 2.4 se muestran las características físico-mecánicas de la arena utilizada para la elaboración de las mezclas de morteros.

Tabla 2.3: Características físico-mecánicas de la arena de la cantera El Purio

Ensayos			
Material más fino que el tamiz 200 (NC 182:2002)			
	Pesos (g)	% pasado por Tamiz - 200	Especificaciones (NC 657:2008)
Peso inicial seco	537.03	2.8	≤ 10
Peso final seco	521.99		
Partículas de arcilla			
	Pesos (g)	% de partículas de arcilla	Especificaciones
Peso inicial	190.52	0.21	1
Peso final	190.12	0.17	
Peso Específico (NC 186:2002)			
	Pesos (g/cm³)	Incertidumbre	Especificaciones (NC 657:2008)
PEC	2.51	0.019	≥ 2,5
PES	2.59	0.019	-
PEA	2.72	0.018	-
% Absorción	3	0.17	≤ 3,0
Peso Volumétrico (NC 181:2002)			
	Peso (Kg/m³)	Incertidumbre	Especificaciones
Peso volumétrico suelto	1509	41.52	-
Peso volumétrico compactado	1547	39.87	

Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 2.4: Resultados del ensayo granulométrico de la arena de la cantera El Purio

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

Fuente: Elaborado por la autora

En la Figura 2.1 se aprecia la curva granulométrica de la arena y se compara con las especificaciones granulométricas mínimas y máximas que deben cumplir las arenas trituradas para ser empleadas en morteros de albañilería de acuerdo a la norma cubana *NC 657:2008 Áridos para morteros de albañilería. Especificaciones*. A partir del análisis del gráfico se establece la no conformidad de la arena empleada para elaborar morteros de albañilería, en los demás ensayos cumple con las especificaciones exigidas por las normas.

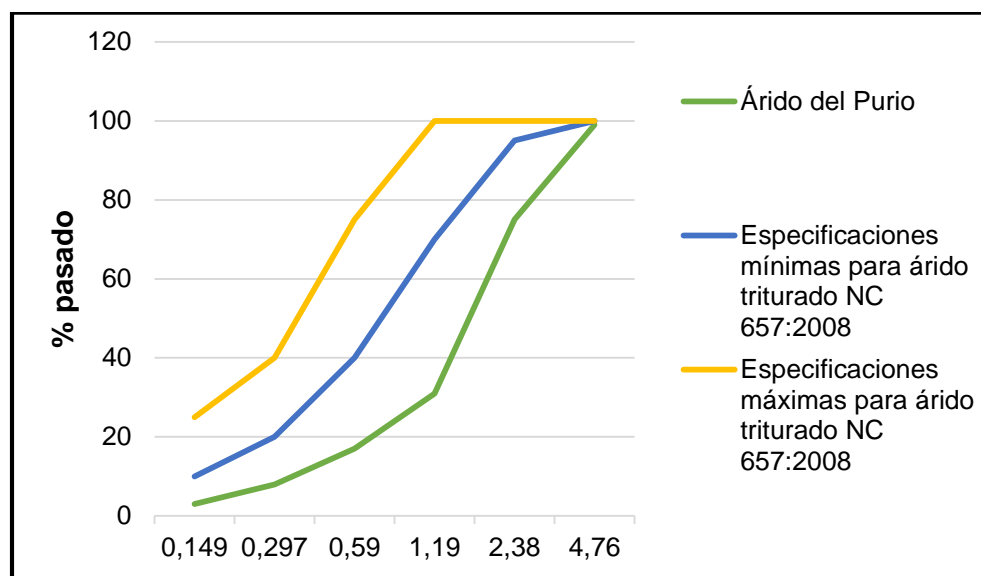


Figura 2.1: Curvas granulométricas. Comparación con las especificaciones de la NC 657:2008.

2.3.6 Agua

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

2.3.7 Cal

La cal fue adquirida de la cantera de Palenque ubicada en el municipio de Camajuaní, Villa Clara. Los ensayos de caracterización de la materia prima fueron realizados en el laboratorio perteneciente al CIDC. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5 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

Fuente: Elaborado por la autora

2.3.8 Cemento de referencia

El cemento seleccionado como referencia para comparar con los dos nuevos aglomerantes fue el PP-25 producido en la fábrica de cemento de Siguaney. La composición mineralógica de este cemento se basa aproximadamente en 79 % de clínquer, 15 % de toba zeolítica y 6 % de yeso. Su caracterización se muestra en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6: Caracterización del cemento PP-25

Ensayos	Unidad	PP-25	Especificaciones
Consistencia normal	%	26,9	-
Tiempo de fraguado inicial	min	210	≥ 45
Tiempo de fraguado final	h	4:45	≤ 12
Finura de molido (retenido)	%	7,0	≤ 15
Peso específico real	g/cm ³	2,8	-
Superficie específica (Blaine)	cm ² /g	3375	-
Resistencia a compresión 3 días	MPa	2,5	-
Resistencia a flexión 3 días		13,1	-
Resistencia a compresión 7 días		21,4	≥ 17
Resistencia a flexión 7 días		6,1	≥ 3
Resistencia a compresión 28 días		30,3	≥ 25
Resistencia a flexión 28 días		7,9	≥ 5

Fuente: Elaborado por la autora

2.4 Protocolo de fabricación de los cementos

Para la fabricación de los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1) se desarrolló el mismo procedimiento, entre ellos solo difiere el residuo cerámico empleado.

La producción de los cementos consistió en la molienda de los residuos cerámicos y la caliza, donde cada uno de estos materiales fue triturado en un molino de martillo. Posteriormente cada material fue molido durante 40 minutos en un molino de bolas de acero MB-600.

Luego de este proceso de molienda, se realizó el mezclado y la homogenización de los polvos de residuos cerámicos y caliza en proporción 2:1 en una mezcladora marca Controls a velocidad lenta durante 3 minutos. Posteriormente el material resultante se mezcló con el cemento P-35 en la mezcladora a velocidad lenta durante 5 minutos. Para lograr la cantidad de material requerida de cada tipo de cemento fue necesario realizar este proceso 3 veces, pues la capacidad de la mezcladora equivale aproximadamente a 3 kg de cemento. La elaboración de dichos cementos se efectuó en el laboratorio de la Facultad de Construcciones perteneciente a la UCLV,

En el Figura 2.2 se muestran los porcentajes de cada materia prima empleados en la formulación de estos cementos para el nivel de sustitución planteado.

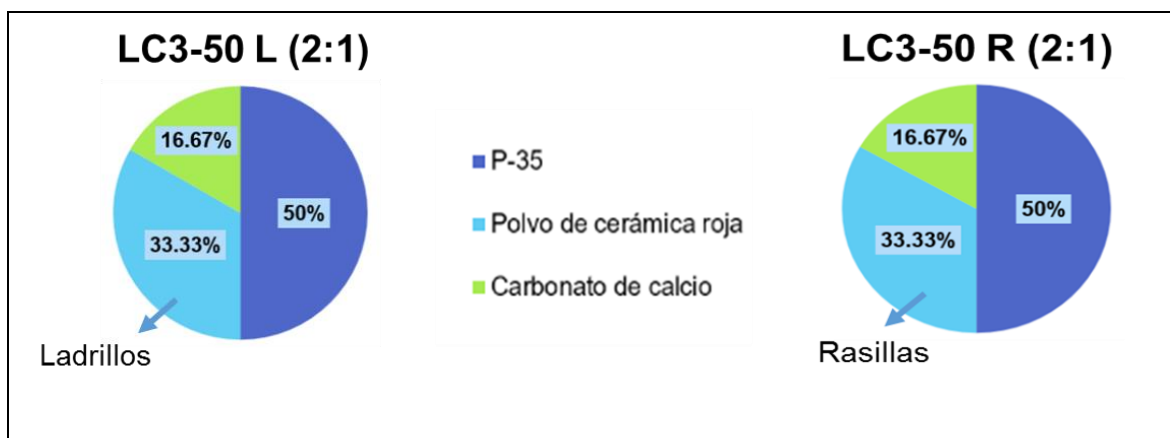


Figura 2.2: Formulaciones de los cementos de bajo contenido de carbono

2.5 Ensayos para la caracterización del cemento

2.5.1 Determinación del fraguado inicial y final

El método de ensayo para determinar la consistencia normal y los tiempos de fraguado mediante la aguja de Vicat se realizó en el laboratorio perteneciente a la ENIA, de acuerdo a lo establecido en la NC 524: 2007 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación

de la consistencia y tiempos de fraguado por aguja de Vicat. El mismo consistió en determinar la cantidad de agua requerida en la preparación de la pasta de cemento hidráulico a ensayar. Para ello se utilizaron 650 g de cada cemento que fueron introducidos en la mezcladora marca Sigma con agua. Para la realización del ensayo se utilizó como instrumento la aguja de Vicat y fue necesaria la preparación de la probeta de pasta. El molde troncónico con la pasta en su interior y la placa de apoyo se sumergió en agua potable a una temperatura de (25 ± 2) °C y cada 5 minutos aproximadamente, se sacó el molde del agua y se colocó debajo de la aguja de Vicat perfectamente limpia y seca, tomándose los valores de penetración de la aguja en la pasta. Se alcanzó un fraguado inicial, cuando la aguja penetró en la probeta (3 ± 1) mm de separación de la placa de vidrio que se utilizó como base. El fraguado final se obtuvo cuando la penetración de la aguja en la probeta fue de 1 mm.

2.5.2 Finura de molido (% pasado tamiz 90 μ m)

Para la determinación de este parámetro se estableció el método de la norma cubana *NC 980:2013 Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la finura y la superficie específica*, que plantea la utilización del tamiz con malla/cm²: 4900, de abertura nominal 0,090 mm y tolerancia media de 7 %. Este ensayo se realizó en el laboratorio perteneciente a la ENIA.

2.5.3 Peso específico real

La determinación del peso específico real (g/cm³) de los cementos se realizó en el laboratorio del CIDC según el procedimiento establecido en la norma cubana *NC 523: 2007 Cemento Hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la densidad*, que plantea la utilización del frasco de Le Chatelier. Para ello se utilizaron aproximadamente 64 g de cada cemento, que fueron introducidos en el equipo y la diferencia entre la lectura inicial y final tomada representó el volumen de líquido desplazado por la masa de cemento usada.

2.5.4 Superficie específica

El ensayo de superficie específica (cm²/g) consistió en la observación del tiempo que tarda cierta cantidad de aire en pasar a través de una capa compactada de cemento de dimensiones y porosidad especificadas. Los principios de este método, los aparatos, materiales y condiciones del ensayo se siguieron de acuerdo a los requerimientos establecidos en la *NC 980:2013 Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la finura y la superficie específica*. Este ensayo se realizó en el laboratorio del CIDC.

2.5.5 Estabilidad de volumen Le Chatelier

El ensayo de estabilidad de volumen se determinó observando la expansión volumétrica de la pasta de cemento de consistencia normal, indicada por el desplazamiento relativo de dos agujas del aparato de Le Chatelier. El procedimiento detallado se realizó en el laboratorio del CIDC según indica la *NC 504:2013 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la estabilidad de volumen.*

2.5.6 Ensayos químicos

En el laboratorio del CIDC se realizaron los ensayos químicos para determinar el Óxido de Magnesio (MgO), Trióxido de Azufre (SO₃), la Pérdida por Ignición (PPI) y el Residuo Insoluble (RI) de cada uno de los cementos, siguiendo los procedimientos operatorios que se describen en la *NC 507: 2007 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Análisis químico.*

2.5.7 Ensayo de resistencia mecánica

Los ensayos de resistencia mecánica se ejecutaron en el laboratorio de la ENIA, donde se fabricaron 3 probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm para cada muestra de cemento a ensayar, a las edades de 3, 7 y 28 días, que equivalen a un total de 27 probetas. Para cada molde de morteros se emplearon 1 350 g de arena estandarizada y 450 g del aglomerante. El procedimiento para el mezclado del mortero, el enmoldado y la compactación de la mezcla, así como la conservación y el curado de las probetas se realizó de acuerdo a las especificaciones de la NC 506:2007. Esta norma también se empleó para el cálculo de los valores de resistencia a flexo-compresión obtenidos en los días de rotura de las probetas.

Para el ensayo de flexión se colocaron las probetas en una prensa “Caenaho” BCCCP (1975) que disponía de 3 cilindros de acero de 10 mm de diámetro, en dos de ellos descansaban las briquetas y el tercero, que se encontraba equidistante de los otros dos, se apoyó sobre la cara opuesta de la probeta ejerciendo una carga vertical que iba creciendo progresivamente.

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

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

$R_c = Q/1600$**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)

2.6 Ensayos a los morteros

En el laboratorio perteneciente a la ENIA se realizaron los ensayos de resistencia a flexo-compresión y absorción de agua por capilaridad de los morteros de albañilería. Estos se elaboraron de acuerdo a la dosificación planteada según el tipo de mortero y con los aglomerantes producidos, tal como se muestra en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7: Dosificaciones de las mezclas de morteros

Serie de mortero	Tipo de cemento	Tipo de mortero	Dosificación			Cantidad de probetas
			Cemento	Arena	Cal	
M-1	LC3-50 L (2:1)	III	1	4	1	15
M-2	LC3-50 R (2:1)	III	1	4	1	15
M-3	PP-25	III	1	4	1	15

Fuente: Elaborado por la autora

A las mezclas de morteros fabricadas se les determinó la consistencia a través de la Mesa de Sacudidas de acuerdo a las especificaciones de la norma *NC 170:2002 Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas*, donde se les adicionó agua a las mezclas hasta que estas cumplieran con lo establecido en dicha norma (190 mm ± 5 mm) de diámetro (Ver Anexo 1).

2.6.1 Producción de probetas prismáticas

La fabricación de las probetas prismáticas se desarrolló de acuerdo al diseño de mezclas planteado y para ello se limpiaron y engrasaron los moldes de 40x40x160 mm a utilizar tomando como referencia las especificaciones indicadas en la norma *NC 173:2002 Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión. Posteriormente se vertió la mezcla en los moldes en dos capas sucesivas compactando cada una con 25 golpes suaves y homogéneos. Se eliminaron los espacios vacíos que quedaron en la superficie de los tres compartimentos. Cuando el mortero comenzó a endurecer, se enrasó el molde con una superficie metálica. Después de 24 horas de elaboradas las probetas se desmoldaron, se marcaron y se sometieron al proceso de curado en un ambiente con humedad relativa de aproximadamente un 90 % (no sumergidas en agua).*

Para cada mezcla diseñada se fabricaron 5 moldes de probetas prismáticas de 40x40x160 mm, para la realización de los ensayos programados en el diseño de experimento.

2.6.2 Ensayo de resistencia a flexo-compresión

El ensayo de flexo-compresión en morteros fue realizado en el laboratorio de la ENIA y este se determinó siguiendo el mismo procedimiento de ensayo y cálculo para la obtención de los valores de resistencia a flexión y compresión en los días de rotura (3, 7 y 28 días), descrito en el epígrafe 2.6.7 dedicado a los ensayos de resistencia mecánica de los morteros de cemento.

2.6.3 Determinación de la absorción de agua por capilaridad

Este ensayo se realiza según la *NC 171:2002 Mortero endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*, para la realización del procedimiento se colocaron en absorción 18 probetas prismáticas, 6 por cada diseño de mezcla elaborado. Las probetas luego de sacadas del curado fueron colocadas en la estufa por 24 horas, posteriormente fueron enfriadas, pesadas para ser colocadas verticalmente sobre un lecho de arena de aproximadamente 10 mm de espesor en una bandeja con 5 mm de agua por encima del lecho de arena. Las mediciones del peso se tomaron a las edades de 4 y 8 horas, además de 1, 3, 5 y 7 días.

2.7 Conclusiones parciales

- La molienda realizada no permite el control estable de la finura y la superficie específica de los cementos ternarios producidos a escala de laboratorio, encontrándose afectada por las diferentes durezas de las materias primas constituyentes del aglomerante.
- La caracterización de los cementos producidos se realizó mediante ensayos, especificados en las normativas vigentes, midiendo parámetros tales como: finura, superficie específica, tiempos de fraguado y peso específico.
- La elaboración de dos dosificaciones de cementos LC3-50, con uso de adición activa formada por la mezcla de polvo de (ladrillo o rasilla) y caliza, en proporción 2:1, permitió comparar y determinar la influencia de estos dos residuos cerámicos sobre las propiedades físico- mecánicas y químicas del aglomerante.
- El árido empleado para la elaboración de las probetas de mortero no satisface las especificaciones en cuanto a la granulometría según lo que establece la NC 54 256:83 lo que puede afectar propiedades como la laborabilidad y la resistencia en las mezclas.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados

3.1 Generalidades

En este capítulo se expone la caracterización y evaluación de los cementos de bajo carbono: LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1), a partir del análisis de los resultados de los ensayos realizados según el diseño experimental. También se analizan los resultados de los morteros con los aglomerantes fabricados para evaluar las propiedades físico-mecánicas de estos. Los resultados obtenidos de los ensayos se comparan con el cemento Pórtland Puzolánico PP-25 y con las normativas nacionales e internacionales vigentes.

Para el procesamiento estadístico de los resultados se emplea el programa Statgraphics Centurion XV. v.15.2.14 con el propósito de determinar si el factor cemento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión y absorción de agua por capilaridad.

3.2 Análisis de los resultados de los cementos

3.2.1 Ensayos de caracterización

Luego de fabricados los cementos mediante el procedimiento descrito en el epígrafe 2.4 fueron sometidos a los ensayos establecidos en la NC 96:2011 para caracterizarlos, además de ser comparados con el cemento PP-25 tomado como referencia, y sus resultados se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2:

Tabla 3.1: Ensayos químicos de los cementos obtenidos con polvos de residuos cerámicos a escala de laboratorio

Ensayos	UM	LC3-50 L (2:1)	LC3-50 R (2:1)
Determinación del Óxido Magnesio (MgO)	%	3,08	1,63
Determinación Gravimétrica del Trióxido de Azufre (SO ₃)		1,06	1,21
Determinación de la Pérdida por Ignición		9,12	7,90
Determinación del Residuo Insoluble		35,12	37,69

Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 3.2: Ensayos físicos de los cementos obtenidos con polvos de residuos cerámicos a escala de laboratorio

Ensayos	UM	LC3-50 L (2:1)	LC3-50 R (2:1)	PP-25
Consistencia normal	%	20,8	24,4	26,9
Tiempo de fraguado inicial	min	125	120	210
Tiempo de fraguado final	h	2:55	2:55	4:45
Finura de molido	% pasado tamiz 90 μ m	74,4	90,4	93
Peso Específico	g/cm ³	2,89	2,86	2,8
Superficie Específica	cm ² /g	3456	3323	3375
Estabilidad de volumen Le Chatelier	mm	1	1	-

Fuente: Elaborado por la autora

3.2.1.1 Superficie específica y Finura de molido

La superficie específica se evalúa utilizando el método Blaine. En la Tabla 3.2 se puede observar que de los cementos mostrados, el LC3-50 L (2:1) presenta la mayor superficie específica, sin embargo, la finura de dicho cemento es la menor. Por lo que se puede arribar a la conclusión de que este método no resulta ideal para evaluar dicho parámetro en cementos que utilizan arcillas calcinadas, al no considerar la superficie que aportan las mismas.

Al analizar la finura se aprecia que el cemento LC3-50 R (2:1), elaborado con polvo de rasilla, presenta una finura similar a la del cemento de referencia. Sin embargo, el cemento LC3-50 L (2:1), elaborado con polvo de ladrillo, tiene una finura considerablemente inferior en un 17 % a la del cemento LC3-50 R (2:1). Además, dicho cemento no cumple las especificaciones establecidas para su función como material puzolánico que establecen valores en un rango del 90 al 95 %.

Este autor considera que dicho resultado está directamente relacionado con la finura alcanzada por el material puzolánico que compone este cemento.

En investigaciones anteriores (Rodríguez, 2014, Delgado, 2015, Aguilar, 2015) los cementos que se elaboraron, aun cuando estaban compuestos por arcilla calcinada en su forma natural, alcanzaron mayores índices de finura, incluso superiores al 93 %. Dichos resultados estuvieron influenciados por el porcentaje de sustitución de arcilla calcinada que incidía en la finura total de molido porque el tamaño de las partículas de arcilla calcinada es de 1 μ m comparado con la del CPO que es 12 μ m.

El registro sobre el tamaño de partículas en este tipo de cemento ternario es muy complejo, pues se dificulta el control de cada uno de los componentes. Este autor considera que existieron una serie de factores que pueden haber influido en que no se lograra una adecuada finura del cemento LC3-50 L (2:1), entre los que se encuentran:

- Dureza del material
- Tiempo de molido
- Distribución de bolas por tamaño
- Cantidad de producto a moler

3.2.1.2 Tiempos de fraguado inicial y final

Los resultados obtenidos del tiempo de fraguado, para ambos cementos, cumplen con las especificaciones establecidas por las normas cubanas NC 96:2011 y NC 97:2011. Se considera importante para estos tipos de cemento el tiempo de fraguado inicial, ya que constituye un parámetro significativo en cementos de albañilería.

En las investigaciones realizadas por (Rodríguez, 2014, Delgado, 2015) fue necesario ajustar el contenido de sulfatos de acuerdo con el nivel de adición de cada mezcla para garantizar los tiempos de fraguado acordes a los rangos establecidos, en cambio en la presente investigación no se realizó dicho ajuste de sulfato y sin embargo los resultados alcanzados en los tiempos de fraguado cumplieron con valores establecidos.

3.2.1.3 Consistencia normal

Los valores de consistencia normal obtenidos de las tres muestras de cementos analizadas resultan similares entre los LC3-50 y estos menores que los del cemento PP-25 como se muestran en la Figura 1 y en la Tabla 3.3. Esto puede tener consecuencias positivas en la resistencia a compresión del cemento, puesto que una mayor cantidad de agua de amasado para adquirir una laborabilidad adecuada, aumenta la relación a/c, en comparación con los demás cementos estudiados. Sin embargo, los resultados de la resistencia mecánica no se comportan de acuerdo a este comportamiento.

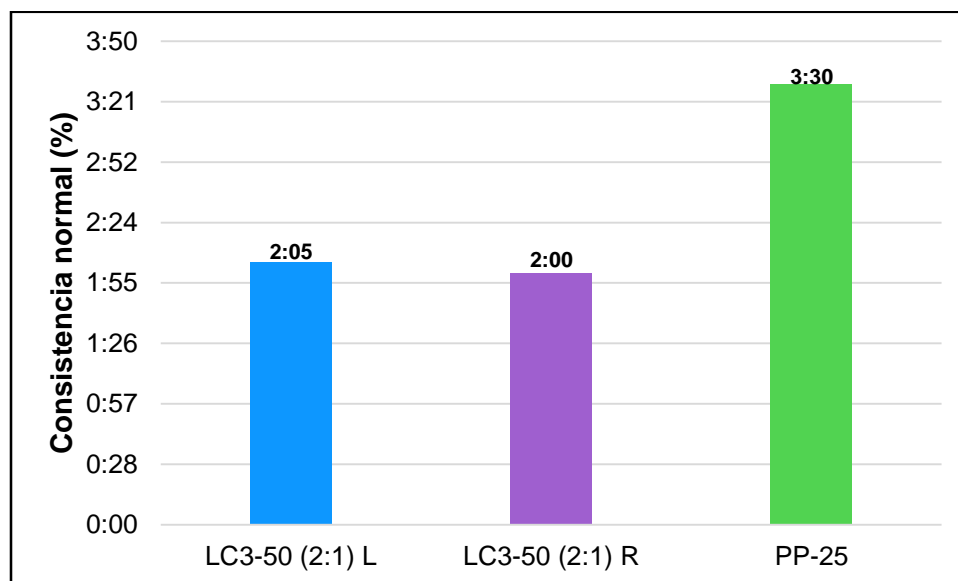


Figura 3.1: Comparación de la consistencia normal en los cementos

Tabla 3.3: Relación consistencia vs tiempos de fraguado de los cementos

Tipo de cemento	Superficie específica (cm ² /g)	Consistencia normal (%)	Tiempo de fraguado (h)	
			Inicial	Final
LC3-50 L (2:1)	3456	20,8	2:05	2:55
LC3-50 R (2:1)	3323	24,4	2:00	2:55
PP-25	3375	26,9	3:30	4:45

Fuente: Elaborado por la autora

En la tabla 3.3 se pueden observar los valores de consistencia de los cementos estudiados y su relación con la superficie específica y los tiempos de fraguado de los mismos. En la figura 3.2, se observa que los resultados iniciales se encuentran en los rangos exigidos en la NC 96- 2011, que establece para el tiempo de fraguado inicial mayor a 45 minutos y menor a 12 horas para el tiempo de fraguado final.

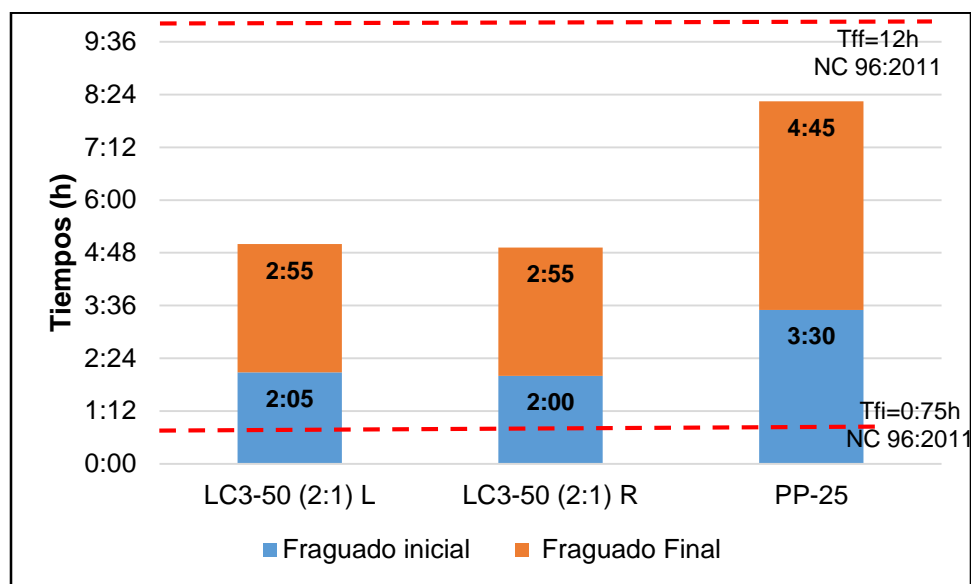


Figura 3.2: Tiempos de fraguado inicial y final promedios de los cementos

3.3.2 Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica de los cementos

La resistencia a flexión y compresión de cada cemento y su referencia fue determinada a las edades de 3, 7 y 28 días, empleándose para cada edad 3 probetas de 40x40x160 mm. En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de las resistencias medias a flexión y compresión obtenidas para cada tipo de cemento ensayado.

Tabla 3.4: Resultados del ensayo de resistencia a flexión y compresión

Tipo de Cemento	Resistencia (MPa)					
	Flexión			Compresión		
	3 días	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
LC3-50 L (2:1)	1,4	2	4,1	6,8	10,3	15,2
LC3-50 R (2:1)	1,9	2,8	6,3	9,8	15,1	21,5
PP-25	2,5	6,1	7,9	13,1	21,4	30,3

Fuente: Elaborado por la autora.

Las Figuras 3.3 y 3.4 exponen el comportamiento de la resistencia a flexión y compresión, respectivamente, para cada edad de ensayo según el tipo de cemento. En ambos gráficos se evidencia, para cada uno de los cementos, el aumento de las resistencias en el tiempo, por lo que su comportamiento es normal.

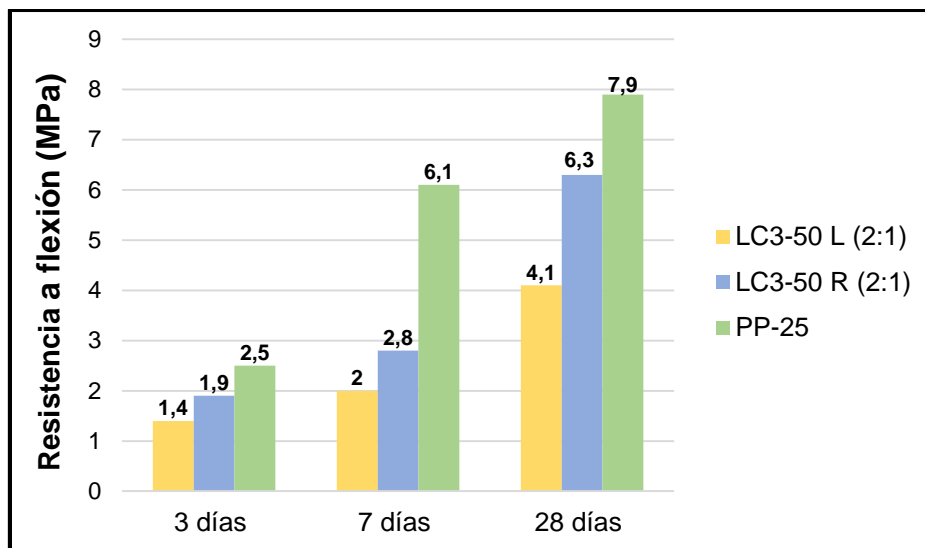


Figura 3.3: Resistencia a flexión en cementos

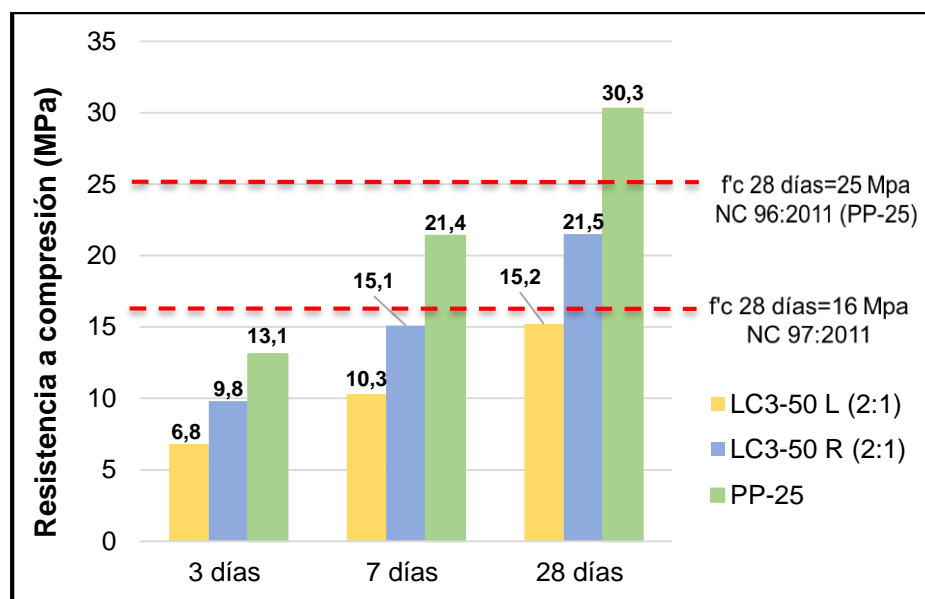


Figura 3.4: Resistencia a compresión en cementos

Cuando se analizan los datos de la Figura 3.4 se puede observar que los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1), presentan resistencias a compresión inferiores con respecto a la muestra patrón (PP-25) y solo el cemento LC3-50 R (2:1) cumple con las especificaciones exigidas en la NC 97:2011 Cemento de Albañilería. Especificaciones, que establece 16 MPa a los 28 días.

Cuando se comparan los valores de resistencia a compresión a los 28 días con la muestra de referencia, se obtiene que las resistencias de los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1) representan el 50,2 y 70,9 % respectivamente, de la resistencia del PP-25.

En la Tabla 3.5 se puede observar que de acuerdo a la resistencia a compresión establecida en la NC 97:2011 a los 28 días, el cemento LC3-50 R (2:1) sobrecumple en un 34,4 %; mientras que el LC3-50 L (2:1) es inferior, representando un 95 % del valor exigido de resistencia exigido. En comparación con la NC 96:2011, las resistencias de los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1) son inferiores a la establecida en esta norma, por lo que representan el 60,8 y 86 % respectivamente de este valor.

Tabla 3.5: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con la NC 96:2011 y NC 97:2011 (según el tipo de cemento)

Tipo de cemento	$f'c$ 28 días (MPa)	$f'c$ 28 días (MPa)	
		NC 97:2011 (cemento albañilería)	NC 96:2011 (cemento PP-25)
LC3-50 L (2:1)	15,2	16	25
LC3-50 R (2:1)	21,5		

Fuente: Elaborado por la autora.

A partir del análisis realizado, el autor considera que el cemento LC3-50 L (2:1) no cumple con las especificaciones de calidad que establecen las normas NC 96:2011 y NC 97:2011 en cuanto a la resistencia a los 28 días pues el valor de finura obtenido para este cemento es muy inferior al que exige la norma.

Se estima que lo planteado anteriormente esté determinado por la finura del material puzolánico (polvo de ladrillo) empleado para la fabricación de dicho cemento, que al no cumplir con la finura requerida para un material de este tipo pues no logra la reactividad necesaria.

Por otra parte, en la Tabla 3.6 y la Figura 3.5 se puede apreciar que al comparar los resultados de resistencia a compresión a los 28 días de los cementos obtenidos, con las normas: (ASTM C-91), chilena (Nch 3121/1-2010), guatemalteca (NTG 41096) y europea (UNE-EN 1971:2011) para los cementos de albañilería, se puede apreciar que el cemento LC3-50 L (2:1) no cumple con los valores exigidos en dichas normas internacionales, mientras que el LC3-50 R (2:1) no cumple con las especificaciones de la UNE-EN 1971:2011.

Tabla 3.6: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con las normas internacionales

Tipo de cemento	$f'c$ 28 días (MPa)	$f'c$ 28 días (MPa)			
		ASTM C-91	NTG 41096	Nch 3121/1-2010	UNE-EN 197-1:2011
LC3-50 L (2:1)	15,2	20			32
LC3-50 R (2:1)	21,5	20			32

Fuente: Elaborado por la autora

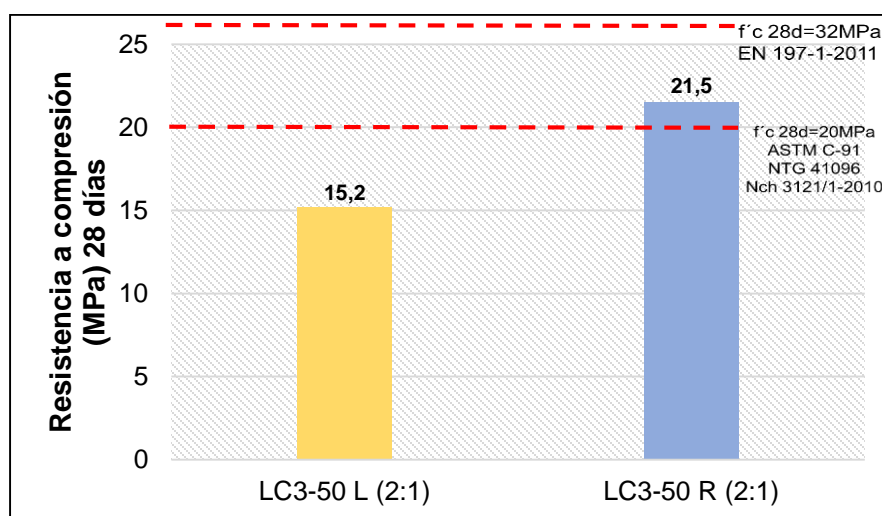


Figura 3.5: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con las normas internacionales

En la Figura 3.6 se muestra la resistencia media a compresión a los 28 días de edad por tipo de cemento, obtenidos del procesamiento estadístico realizado en el software Statgraphics.

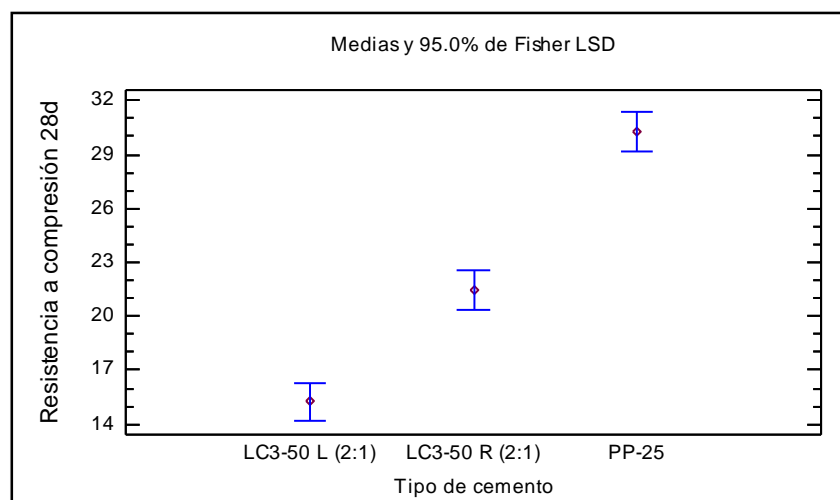


Figura 3.6: Medias y 95% de Fisher LSD ($f'c$ -vs- tipo de cemento)

El método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher se emplea para discriminar entre las medias con confiabilidad del 95%. Mediante la prueba de múltiples rangos para resistencia a compresión de los cementos se plantea que entre las medias de los tipos de cementos: LC3-50 L (2:1), LC3-50 R (2:1) y PP-25, existen diferencias significativas entre los tres pares que se forman. Además, mediante el análisis de varianza se tiene que al obtener los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores que 0.05, el tipo de cemento tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión a 28 días, con un 95% de confianza (Ver Anexo II).

3.4 Análisis de los resultados de morteros

3.4.1 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia mecánica de los morteros

La resistencia a flexión y compresión de los morteros de albañilería fue determinada a las edades de 3, 7 y 28 días, empleándose para cada edad 3 probetas de 40x40x160 mm. En la Tabla 3.7 se aprecian los resultados de las resistencias medias a flexión y compresión obtenidas para cada serie de mortero ensayado.

Tabla 3.7: Resultados del ensayo de resistencia a flexión y compresión en morteros

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
M-1	III (1:4:1)	LC3-50 L (2:1)	0,5	1,2	2,7	2,5	4,2	6,4
M-2		LC3-50 R (2:1)	0,5	0,9	2,3	1,9	3,9	6,3
M-3		PP-25	1,4	2,5	5,2	3,6	8,3	15,1

Fuente: Elaborado por la autora.

Las Figuras 3.7 y 3.8 exponen el comportamiento de la resistencia a flexión y compresión, respectivamente, para cada edad de ensayo según la serie de mortero. En ambos gráficos se evidencia para cada serie de mortero, el aumento de las resistencias en el tiempo comportándose de modo normal.

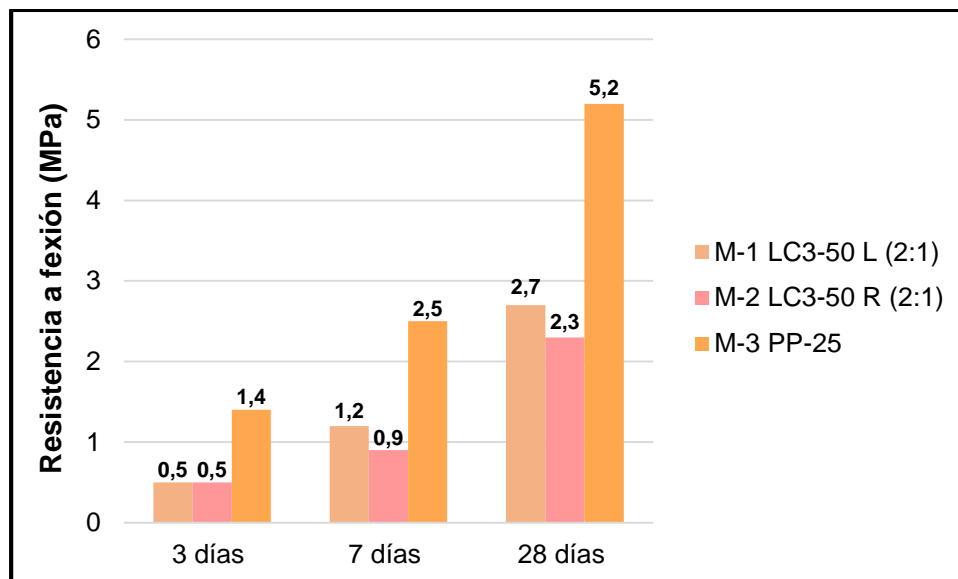


Figura 3.7: Resistencia a flexión en morteros

A partir del análisis de los datos obtenidos en el gráfico de la Figura 3.6 se puede apreciar que los morteros fabricados con los cementos LC3-50 L (2:1) y LC3-50 R (2:1), aunque presentan resistencias a compresión inferiores con respecto a la muestra patrón (PP-25), cumplen con las especificaciones establecidas por la NC 175:2002, que establece 5,2 MPa a los 28 días para los morteros tipo III.

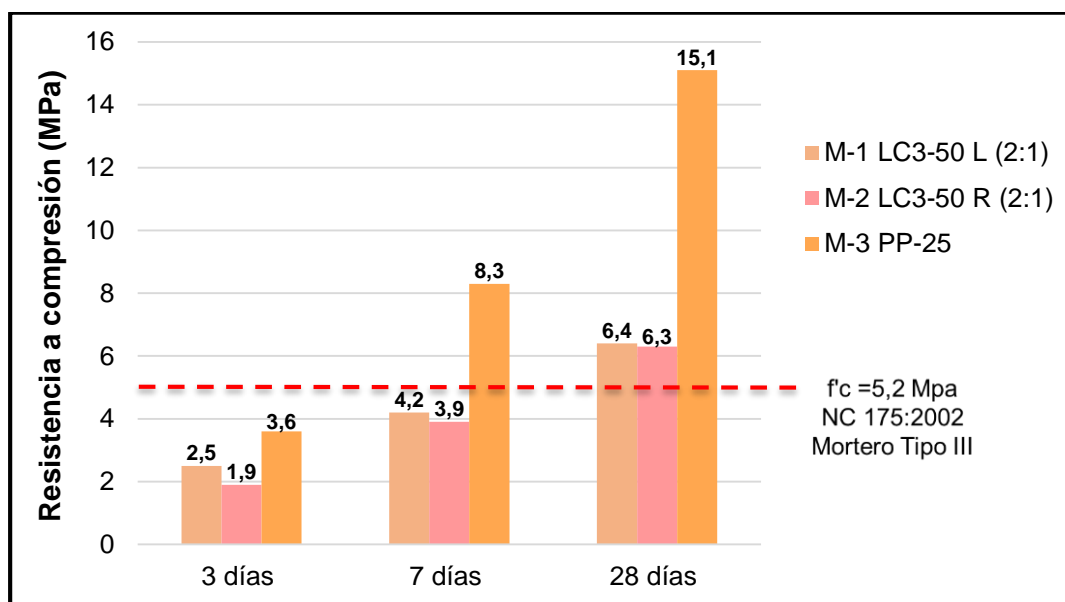


Figura 3.8: Resistencia a compresión en morteros

Al comparar los valores de resistencia a compresión a los 28 días de las series M-1 y M-2 con respecto a la muestra patrón M-3, se obtiene que las mismas representan el 42,4 y 41,7 % respectivamente, de la resistencia de la serie M-3.

En la Tabla 3.8 se evidencia que las muestras M-1 y M-2 sobrecumplen en un 23,1 y 21,2 % respectivamente, a la resistencia establecida a los 28 días según la NC 175:2002 para el cemento PP-25.

Tabla 3.8: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con la NC 175:2002 (según el tipo de cemento)

Muestra	Dosificación	Tipo de cemento	$f'c$ (MPa) 28 días	$f'c$ (MPa) NC 175:2002 (cemento PP-25)
M-1	1:4:1	LC3-50 L (2:1)	6,4	5,2
M-2	(cem:arena:cal)	LC3-50 R (2:1)	6,3	(tipo III)

Fuente: Elaborado por la autora.

Al comparar los morteros M-1 y M-2 con algunas normativas internacionales: UNE-EN 998-2:2004/ mortero de albañilería; UNE-EN 998-1/ morteros de revoco y enlucidos; NCh 2256/1.Of2001 y ASTM C-270 se puede observar que los mismos cumplen con los valores establecidos por dichas normas, tal como se muestra en la Tabla 3.9:

Tabla 3.9: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con las normas internacionales

Muestra	Tipo de cemento	$f'c$ (MPa) 28 días	$f'c$ (MPa) 28 días UNE-EN 998-2:2004 (mortero de albañilería)	$f'c$ (MPa) 28 días UNE-EN 998-1 (morteros de revoco y enlucidos)	$f'c$ (MPa) 28 días NCh 2256/1.Of2001		ASTM C-270 (cemento P-35 y cementos mezclados)
					Ext.	Inter.	
M-1	LC3-50 L (2:1)	6,4	2,5 (M-2,5)	1,5 a 5,0 (CS II) 3,5 a 7,5 (CS III)	2,5	1,0	5,2 (tipo N)
M-2	LC3-50 R (2:1)	6,3					

Fuente: Elaborado por la autora.

En la Figura 3.9 se muestra que el mortero M-1, sobrecumple en un 156; 326,7; 82,8; 156 y 23,1 % respectivamente, a las resistencias establecidas en las normas internacionales representadas. En el caso del mortero M-2 este sobrecumple en un 152; 320; 80; 152 y 21,2 % respectivamente.

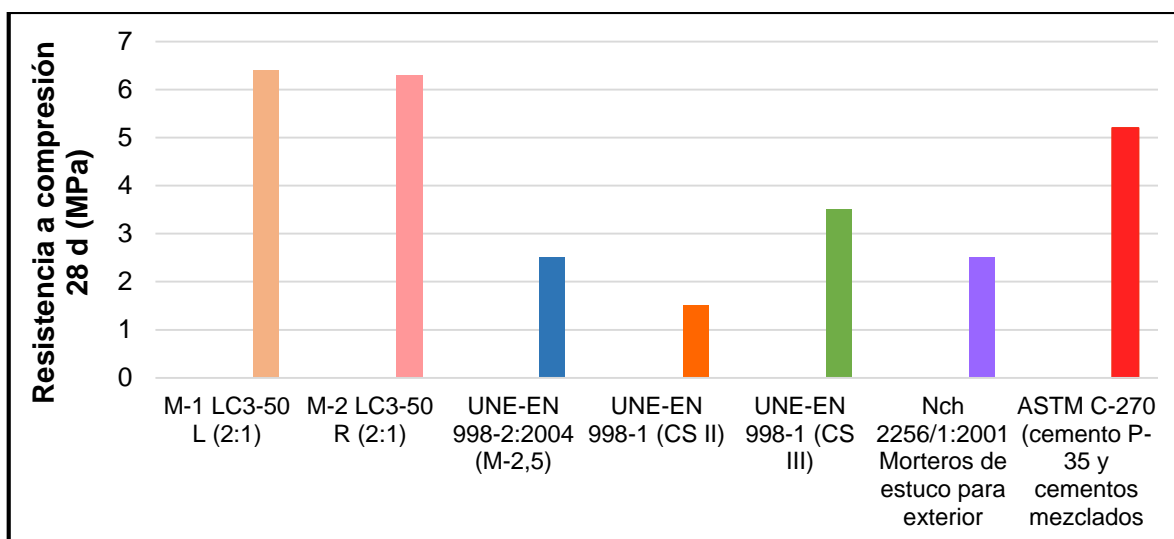


Figura 3.9: Comparación de los resultados de $f'c$ a los 28 días con las normas internacionales

A continuación, se muestra en la Figura 3.10 la resistencia media a compresión a los 28 días de edad por tipo de cemento, obtenidos a través procesamiento estadístico realizado en el software Statgraphics.

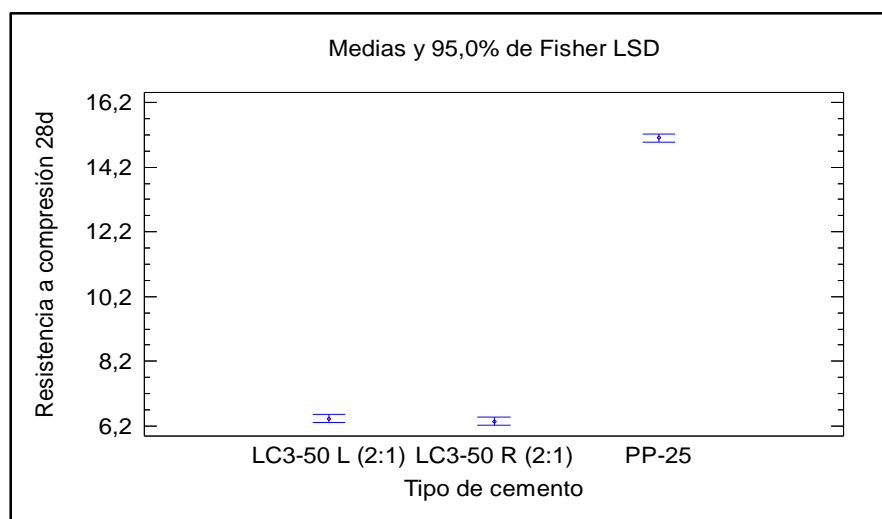


Figura 3.10: Medias y 95% de Fisher LSD ($f'c$ morteros -vs- tipo de cemento)

A partir de la prueba de múltiples rangos para resistencia a compresión de los morteros por tipo de cemento se plantea que entre las medias de los tipos de cementos empleados para la producción de morteros de albañilería: LC3-50 L (2:1), LC3-50 R (2:1) y PP-25, solamente existen diferencias significativas entre los cementos LC3-50 L (2:1) - PP-25 y LC3-50 R (2:1) - PP-25, pero no entre los cementos LC3-50. Además en el análisis estadístico se

obtienen los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores que 0.05, el tipo de cemento tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión a 28 días, con un 95% de confianza (Ver Anexo III).

3.4.2 Análisis de los resultados obtenidos del ensayo de absorción capilar

El ensayo de absorción de agua por capilaridad fue realizado después de los 28 días de curado. Para cada serie de mortero se fabricaron 6 probetas prismáticas de 40x40x160 mm, las cuales se pesaron consecutivamente en las edades exigidas por las normativas vigentes (4h, 8h, 1d, 3d, 5d y 7d) obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3.10:

Tabla 3.10: Resultados del ensayo de absorción capilar

Serie de mortero	Tipo de cemento	Absorción (g/cm ²)					
		4h	8h	1d	3d	5d	7d
M-1	LC3-50 L (2:1)	0,69	0,96	1,59	2,17	2,17	2,17
M-2	LC3-50 R (2:1)	1,05	1,38	1,97	2,19	2,21	2,21
M-3	PP-25	0,4	0,55	0,91	1,2	1,29	1,39

Fuente: Elaborado por la autora

En la Figura 3.11 se evidencia que al variar el tipo de cemento en la fabricación de los morteros de albañilería: M-1 y M-2 existen diferencias en los valores obtenidos a las 4h, 8h y 1 día, para el resto de los días (3, 5 y 7) las diferencias que se aprecian entre estos morteros no resultan significativas. Ambas series de morteros presentan valores de absorción mayores que el PP-25.

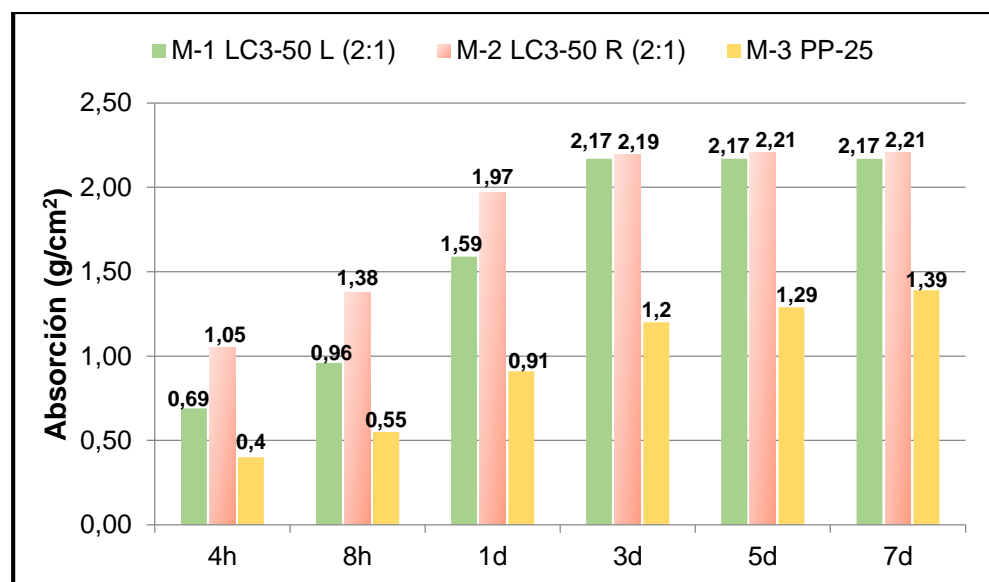


Figura 3.11: Absorción de agua por capilaridad

Mediante el análisis estadístico reflejado en el Anexo IV se obtuvo al obtener los valores que prueban la significancia estadística de cada uno de los factores (valores-P), menores

que 0.05, que al variar el tipo de cemento existe un efecto significativo sobre la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de ensayo, con un 95 % de confianza. Mediante la prueba de Múltiples Rangos que evalúa cuales medias son significativamente diferentes, se plantea que entre las medias de los tipos de cementos empleados para la producción de morteros de albañilería: LC3-50 (2:1), LC3-50 R (2:1) y PP-25, existen diferencias significativas solamente entre los cementos LC3-50 L (2:1) - PP-25 y LC3-50 R (2:1) - PP-25, pero no entre los cementos LC3-50.

3.5 Conclusiones parciales

- La adición de puzolanas, de forma general, promovió cambios en las propiedades físicas de los cementos elaborados. Entre los cambios se encuentran la reducción de la densidad y los tiempos de fraguado.
- Los resultados de la resistencia mecánica, a los 28 días, mostraron que la sustitución de cemento hasta en un 50 % por las puzolanas (polvo de ladrillo y rasilla), no logra un nivel satisfactorio de resistencia respecto a la muestra patrón. De los dos cementos elaborados tiene un mejor comportamiento mecánico el cemento LC3-50 R (2:1) que sobrecumple en un 34% los valores de la norma *NC 97:2011 Cemento de Albañilería. Especificaciones*.
- El procedimiento para la molienda de los residuos cerámicos utilizado por el autor se mostró inadecuado en el logro de una óptima confección de los cementos, pues en el caso del polvo de ladrillo no cumplió con los parámetros establecidos en cuanto a finura. Las principales razones para el bajo rendimiento del referido procedimiento fueron atribuidas a la dureza del material, a la falta de un protocolo experimental para la molienda y a las características del molino (distribución de bolas por tamaño).
- Los resultados indican que los morteros, que contienen cemento LC3 tienen valores de resistencia mecánica muy similares siendo menores que la muestra patrón en un 60 % pero cumplen con los valores establecidos por las normas internacionales para morteros de albañilería (UNE-EN 998-2:2004, UNE-EN 998-1, NCh 2256/1 del 2001, ASTM C-270). El mortero con mayor absorción es el M-2, elaborado con cemento LC3-50 R (2:1).

CONCLUSIONES GENERALES

1. En el contexto internacional, el aprovechamiento de los residuos cerámicos molidos por su carácter puzolánico, constituye una opción atractiva como fuente de materiales de construcción para la obtención de cementos y morteros, debido a su amplia disponibilidad y los beneficios técnicos y ambientales que genera. Además, ha quedado demostrado que su uso en las proporciones adecuadas mejora las propiedades hidráulicas, la durabilidad y resistencia mecánica en cementos y morteros.
2. La producción de cemento LC3, a escala local, constituye una opción alternativa para mitigar la creciente demanda nacional y de esa forma disminuir el impacto ambiental y energético que genera la producción industrial.
3. La molienda realizada no permite el control estable de la finura y la superficie específica de los cementos ternarios producidos a escala de laboratorio, encontrándose afectada por las diferentes durezas de las materias primas constituyentes, a la falta de un protocolo experimental para la molienda y a las características del molino (distribución de bolas por tamaño).
4. Las variaciones observadas en los resultados de finura del residuo de cerámica (polvo de ladrillo y de rasilla) utilizado en este estudio indican que este proceso se puede optimizar a través de un estudio específico para este propósito.
5. Los resultados de la resistencia mecánica, a los 28 días, mostraron que la sustitución de cemento hasta en un 50% por las puzolanas (polvo de ladrillo y rasilla), no logra un nivel satisfactorio de resistencia respecto a la muestra patrón. De los dos cementos elaborados tiene un mejor comportamiento mecánico el cemento LC3-50 R (2:1) que sobrecumple en un 34% los valores de la norma NC 97:2011 Cemento de Albañilería. Especificaciones.

RECOMENDACIONES

1. Realizar otros ensayos a escala micro que permitan la evaluación de la estructura de poros en las pastas y los procesos de reactividad puzolánica.
2. Continuar la investigación mediante la realización de ensayos acelerados de durabilidad a nivel de laboratorio, que permitan predecir el comportamiento químico de los cementos LC3-50 (2:1) en morteros de albañilería.
3. Este trabajo sugiere una investigación de la actividad puzolánica de los residuos de cerámica a partir de la implementación de métodos directos.
4. Mejorar la eficiencia de los procesos, de modo que se pueda lograr un material puzolánico, con la finura adecuada, directamente a través de su molienda.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, Y. 2015. "Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa". Tesis de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- AL-AKHRAS, N. M. 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research* [Online], 36.
- ALUJAS, A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Tesis de Doctorado, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- AMBROISE, J., MURAT, M. & PERA, J. 1985. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions. *Cement and Concrete Research* [Online], 15 (2).
- ANDERSEN, M. D., JAKOBSEN, H. J. & SKIBSTED, J. 2003. Incorporation of Aluminum in the Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) of Hydrated Portland Cements: A High-Field ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR Investigation. *Inorganic Chemistry* [Online].
- ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTIRENA, F. & SCRIVENER, K. L. 2012. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research* [Online], 42 (12).
- AY, N. & UNAL, M. 2000. The use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research* [Online], 30.
- BAI ET AL. 2003. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research* [Online], 33.
- BARCELO, E. A. 2013. Portland Limestone Cement Equivalent Strength Explained. *Concrete international* [Online].
- BONAVETTI, V. L. 1998. *Limestone filler cements: Interaction mechanism audits influence on mechanical properties* Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentine.
- BONAVETTI, V. L. & RAHHAL, V. F. 1996. Morteros de cemento pórtland con adición de filler calizo. *Hormigón*, 30
- BONAVETTI, V. L., RAHHAL, V. F. & IRASSAR, E. F. 2001. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blend. *Cement and Concrete Research*, 31 (6).

- CÁNOVAS, M. F. 2002. *Hormigón*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- CASTILLO, R. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CEMBUREAU. 2010. Activity report. Available: www.cembureau.eu.
- CORDEIRO ET AL. 2002. Caracterización de residuos de ladrillos cerámicos molidos para su uso como aditivo mineral en concretos y morteros. *In: Congreso Brasileño del Concreto, Belo Horizonte*.
- CYR, M., LAWRENCE, P. & RINGOT, E. 2006. "Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength". *Cement and Concrete Research*, 36 (2).
- DAMTOFT ET AL. 2008. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research* [Online].
- DELGADO, L. M. 2015. *Formulación de cementos de bajo carbono con sustituciones del 60 y 75 por ciento de clínquer por adiciones de caliza- arcilla calcinada en la planta de cemento de Siguaney*. Tesis de diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- DELORT, M. 2013. Low-Clinker Ternary Cements: Performance and Standardization. *In: IN 7TH VDZ INTERNATIONAL CONGRESS*. PARIS, F. (ed.).
- DEPARTMENT, B. 2006. Available: <http://www.info.gov.hk/bd/english/index.html>.
- DÍAZ, Y. 2011. *Evaluación del uso del carbonato de calcio como aditivo fundente en la producción de ladrillos cerámica roja. Investigación y desarrollo*. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- FARIAS, J., ROLIM, J. S. & TOLEDO, R. D. 2000. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, 4 (3).
- FERNÁNDEZ, R., MARTIRENA, F. & SCRIVENER, K. 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement & Concrete Research*, 41.
- FRÍAS, M. 2000. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin±cement pastes. *Cement and concrete research* [Online], 30.

- GHRICI, M., KENAI, S. & SAID-MANSOUR, M. 2007. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites* [Online].
- GODOY, O. R. 2006. *Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos*. Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- GONGALVES ET AL. 2009. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction and Building Materials* [Online], 23.
- GONGALVES, J. P. 2005. *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial*. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro.
- GONGALVES, J. P., TOLEDO, R. D. & FAIRBAIRN, E. M. 2006. Estudo da hidratação de pastas de Cimento Portland contendo resíduo Cerâmico por meio de análise térmica. 6 (4).
- HABERT, G., ARRIBE, D., DEHOVE, T., ESPINASSE, L. & ROY, R. L. 2012. "Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges". *Journal of Cleaner Production*.
- HAWKINS, P., TENNIS, P. & DETWILER, R. 2003. The use of limestone in Portland cement: A state-of-the-Art Review. *Engineering Bulletin*.
- HE, C., MAKOVICKY, E. & OSBÆCK, B. 2000. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica / smectite. *Applied Clay Science*.
- HE, C., MAKOVICKY, E. & OSBAECK, B. 1995 Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. *Applied Clay Science*.
- HECHE, C. 2011. *Análisis de la adición de nano partículas en la microestructura de materiales de base cemento*. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid.
- HEWLETT ET AL. 2004. *LEA's Chemistry of cement and concrete*.
- HILL, R. & BOWEN, P. 1997. "Sustainable construction: principles and a framework for attainment". *Construction Management Economics*, (15).
- JUSTICE, J. M. 2005. *Evaluation of metakaolins for use as Supplementary Cementitious Materials*. Master Thesis, Georgia Institute of Technology.
- KIHARA, Y. & SHUKUZAWA, J. K. 1982. Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. *Cerâmica*. 28 (145).
- LIMA, J. 2004. *Estudio de aprovechamiento de los residuos como materia prima en la producción de puzolanas para cementos compuestos y puzolánicos*. Tesis de Maestría, Belém.

- LÓPEZ, F. 2008. *Produção de argamassas a partir da ativação alcalina de metacaulim e de resíduo de tijolo moído por cales virgem e hidratada*. Tesis de Maestría, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- LOTTHENBACH ET AL. 2008. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38.
- LOURENZO, G. M. 2014. *Argamassas de reabilitação com resíduos de Cerâmica*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra.
- MARTÍNEZ, L. C. & HURTADO, M. A. 2014. “*Estudio y caracterización del residuo de la fabricación de tuberías en acero para determinar su uso en la producción de morteros y concretos*” Tesis de diploma, Universidad de Cartagena.
- MARTIRENA, F. El Cemento de Bajo Carbono. 2014 CIDEM. Universidad Central Las Villas.
- MARTIRENA, F., BETANCOURT, S., GONZÁLEZ, R., MACHADO, I., ALUJAS, A., MARTÍNEZ, L. & SEIJO, P. 2015 *Manual de Calidad LC3 Cemento de bajo carbono*.
- MASSAZZA, F. 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites* [Online], 15 (4).
- MATSCHEI, T. & GLASSER, F. P. 2006. The influence of limestone on cement hydration. 59 (12).
- MATSCHEI, T., LOTTHENBACH, B. & GLASSER, F. P. 2007. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37 (4).
- MEDINA, C., ROJAS, M. I. S. D. & FRÍAS, M. 2012. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites* [Online], 34.
- MEDINA, C., ROJAS, M. I. S. D. & FRÍAS, M. 2013. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 40.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 1994. *Concreto: estructura, propiedades y materiales*.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 2006. “Concrete microstructure, properties, and materials”.
- MENÉNDEZ, G., BONAVETTI, V. L. & IRASSAR, E. F. 2006. Ternary blended cement concrete. *Part I: Early age properties and mechanical strength* 56 (284).
- MONTEAGUDO, S. 2014. *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*. Tesis Doctoral, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

- MOREJÓN, L. 2015. *Morteros de cemento con adiciones de humo de sílice y nanosílice*. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid.
- OLIVIER, J. G. J., JANSSENS-MAENHOUT, G. & PETERS, J. A. H. W. 2012. Trends in global CO₂ emissions.
- PACHECO-TORGAL, F. & JALALI, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials* [Online], 24.
- PARDO, N., MOYA, J. A. & MERCIER, A. 2011. "Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry". *Energy*, (36).
- PÉRA, J., HUSSON, S. & GUILHOT, B. 1999. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement & Concrete Composites*, 21.
- PÉREZ, F. 2013. "Cuba, pionera en la producción de cemento ecológico". *Periódico Granma*.
- PÉREZ, F. 2015. Inician pruebas de durabilidad del cemento de bajo carbono. *Periódico Granma*.
- POON ET AL. 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research* [Online], 31 (9).
- PUERTAS ET AL. 2006. Ceramic waste as raw materials in Portland cement clinker fabrication: characterization and alkaline activation. *Materiales de Construcción* [Online], 56 (281).
- PUERTAS ET AL. 2010. Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material. Characterization, hydration and leaching studies. *Cement & Concrete Composites* [Online], 32.
- PUERTAS ET AL. 2008 Ceramic wastes as alternative raw materials for the Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites* [Online], 30 (9).
- RAHHAL, V. & TALERO, R. 2002. Análisis de la influencia de las adiciones cristalinas sobre la hidratación de los cementos pórtland. *Asociación Química Argentina* [Online].
- RAMACHANDRAN ET AL. 2002. Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. *First ed. Construction Materials Science and Technology Series*. V.S. Ramachandran. 2002, William Andrews Publishing/Noyes Publications: New York, U.S.A.
- RODRÍGUEZ, C. M. 2014. *Evaluación de propiedades físico-mecánicas en morteros de albañilería a partir de cementos con sustituciones de clínquer por arcillas calcinadas y caliza*. Tesis de diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

- ROGERS, S. B. 2011. *Evaluation and Testing of Brick Dust as a Pozzolanic Additive to Lime Mortars for Architectural Conservation*. Masters Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia.
- SABIR ET AL. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites* [Online], 23.
- SAGAR, P. & SINGH, B. K. 2007. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bulletin of Materials. Science*, 30 (3).
- SANDBERG, P. 2003. Studies of Cement-Admixture Interactions Related to Aluminate Hydration Control by Isothermal Calorimetry. *American Concrete Institute. International Concrete Abstracts Portal* [Online], 217.
- SCRIVENER, K. L. 2014. Options for the future of cement. *The Indian Concrete Journal*, 88.
- SEPULCRE, A. 2005. *Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico*. Tesis de Doctorado, Madrid.
- SILVA, Y., RAFAEL, R., PEDRO, M. & SILVIO, D. 2015. Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición. *Rev. LatinAm. Metal*, 35 (1).
- SZABÓ, L., HIDALGO, I., CISAR, J. C. & SORIA, A. 2006. "CO2 emission trading within the European union and annex b countries: the cement industry case". *Energy Policy*, (34).
- TALERO, R. 2005. Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: kinetic and morphological differences. *Cement and Concrete Research* [Online], 35.
- TAYLOR, M., TAM, C. & D., G. 2006. "Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry". In: AGENCY, I. E. (ed.) *Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry*. Paris.
- TENNIS, P. D., THOMAS, M. D. A. & WEISS, W. J. 2011. State of the art report on use of limestone in cements at levels of up to 15%, R.D. Information. Available: www.cement.org.
- THIENEL, C., BEUNTNER, N. & DOI, K. R. Efficiency of calcined clay in cementitious systems. Conference: 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, At Prag, 2015.
- TOBÓN, J. I. & KAZES, R. 2008. Desempeño del cemento Pórtland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza.
- TSIVILIS ET AL. 1999. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. *Cement and Concrete Composites*.

- U.S.G.S. 2002. Mineral Commodity Summaries. *U.S. Geological Survey* [Online]. Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>.
- U.S.G.S. 2013. Mineral Commodity Summaries. *U.S. Geological Survey* [Online]. Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>
- VANDERLEY, J. 2002. On the sustainability of the Concrete. *Journal Industry and Environment*.
- VIZCAÍNO, L. M. 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer- arcilla calcinada- caliza*. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- WADEL, G. 2014. *La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- ZERQUERA, I. V. 2015. Produce cemento ecológico Industria local de Manicaragua. *Periódico Vanguardia, Villa Clara, Cuba*.
- ZHANG, Y. M., SUN, W. & YAN, H. D. 2000. Hydration of high-volume fly ash cement pastes. *Cement and Concrete Composites* [Online], 22 (6).

ANEXOS

Anexo I. Consistencia en morteros

Determinación de la Consistencia en la mesa de sacudidas

Muestra	Cemento	Arena	Tipo de mortero	Dosificación	Consistencia (mm)	Cantidad de agua (ml)
M-1	LC3-50 L (2:1)	Purio	III	1:4:1	185	310
M-2	LC3-50 R (2:1)	Purio	III	1:4:1	190	300
M-3	Ref. PP-25	Purio	III	1:4:1	185	285

Fuente: Elaborado por la autora

Anexo II: Análisis estadístico de la resistencia a compresión a los 28 días de los cementos LC3-50 L (2:1), LC3-50 L (2:1) y PP-25

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

Variable dependiente: Resistencia a compresión 28 d

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Resistencia a compresión 28 d. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Resistencia a compresión 28d para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si le preocupa la presencia de valores atípicos, puede elegir la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias.

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

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	687.773	2	343.887	111.39	0.0000
Intra grupos	46.3067	15	3.08711		
Total (Corr.)	734.08	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Resistencia a compresión 28d en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 111.394, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe

una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Resistencia a compresión 28d entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

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

Tipo de cemento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
LC3-50 L (2:1)	6	15.2333	0.717299	14.1522	16.3144
LC3-50 R (2:1)	6	21.4667	0.717299	20.3856	22.5478
PP-25	6	30.3	0.717299	29.2189	31.3811
Total	18	22.3333			

Esta tabla muestra la media de Resistencia a compresión 28d para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95.0% de las veces. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

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

Método: 95.0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
LC3-50 L (2:1)	6	15.2333	X
LC3-50 R (2:1)	6	21.4667	X
PP-25	6	30.3	X

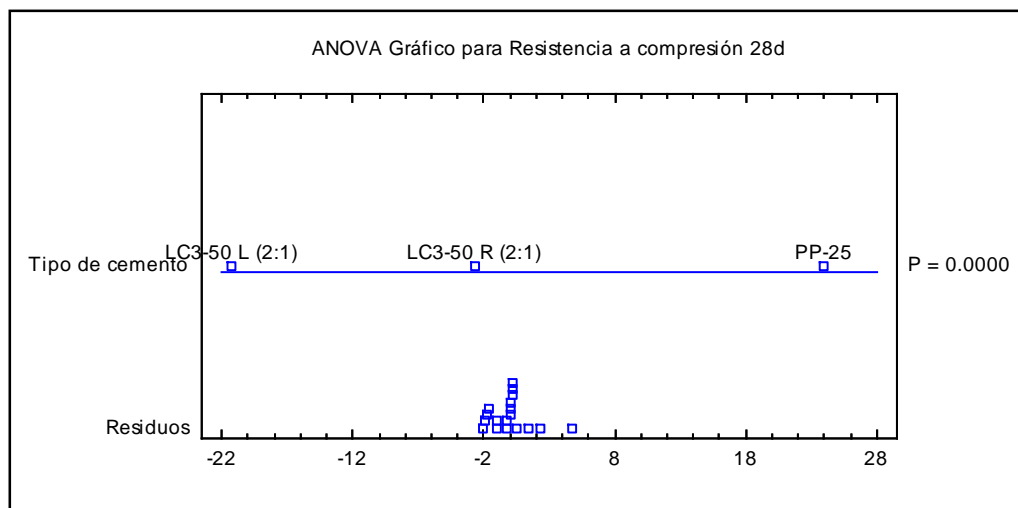
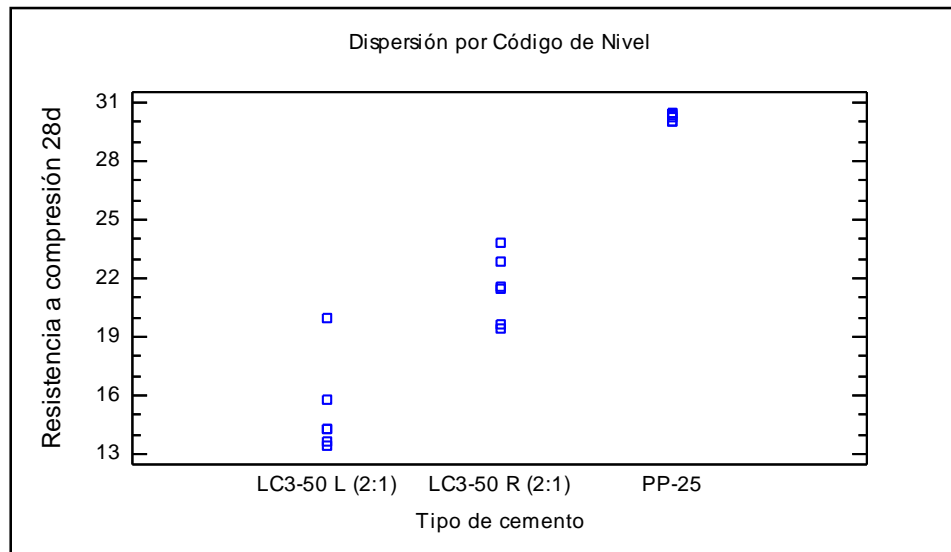
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3-50 L (2:1) - LC3-50 R (2:1)	*	-6.23333	2.16218
LC3-50 L (2:1) - PP-25	*	-15.0667	2.16218
LC3-50 R (2:1) - PP-25	*	-8.83333	2.16218

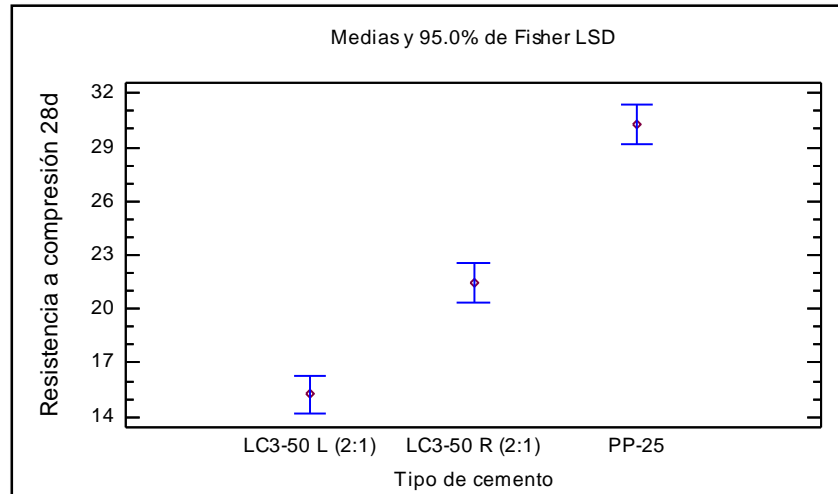
* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de

los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Resultados Gráficos:





Anexo III. Análisis estadístico de la influencia de los cementos en la resistencia a compresión (28 días) de los morteros evaluados

ANOVA Simple - Resistencia a compresión 28d por Tipo de cemento

Variable dependiente: Resistencia a compresión 28d

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Resistencia a compresión 28d. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Resistencia a compresión 28d para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si le preocupa la presencia de valores atípicos, puede elegir la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias.

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

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	303,361	2	151,681	3123,86	0,0000
Intra grupos	0,728333	15	0,0485556		
Total (Corr.)	304,089	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Resistencia a compresión 28d en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-

F, que en este caso es igual a 3123,86, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Resistencia a compresión 28d entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla de Medias para Resistencia a compresión 28d por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95,0%

Tipo de cemento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
LC3-50 L (2:1)	6	6,43333	0,0899588	6,29775	6,56892
LC3-50 R (2:1)	6	6,35	0,0899588	6,21442	6,48558
PP-25	6	15,1	0,0899588	14,9644	15,2356
Total	18	9,29444			

Esta tabla muestra la media de Resistencia a compresión 28d para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

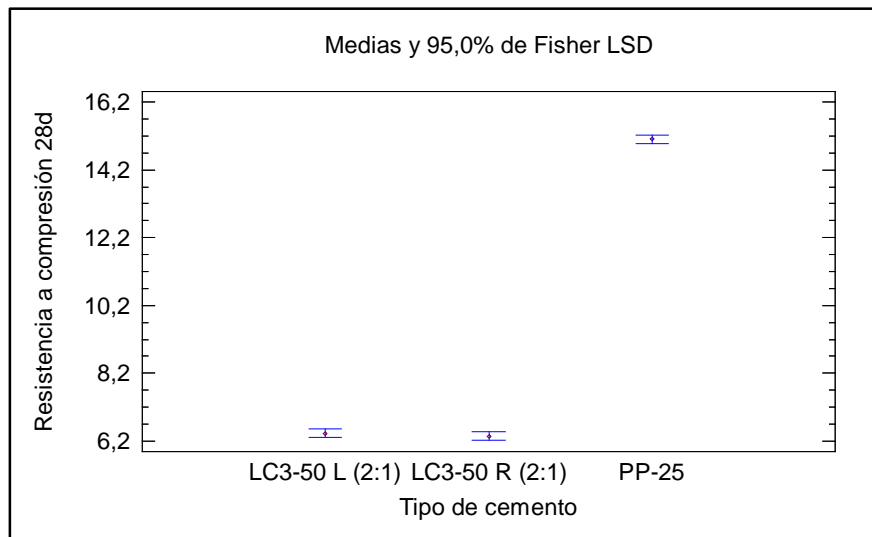
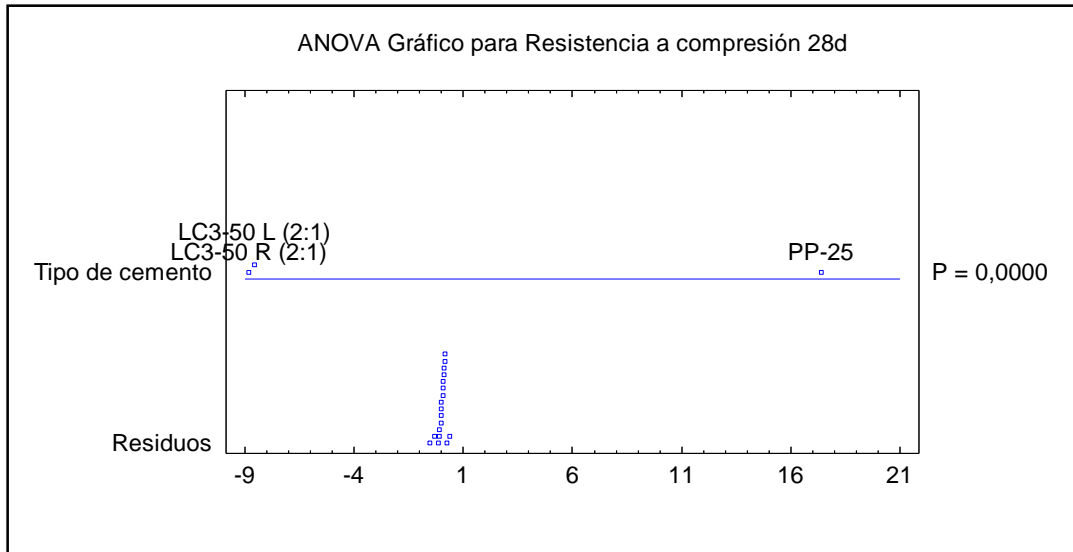
Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a compresión 28d por Tipo de cemento

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Tipo de cemento</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
LC3-50 R (2:1)	6	6,35	X
LC3-50 L (2:1)	6	6,43333	X
PP-25	6	15,1	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3-50 L (2:1) - LC3-50 R (2:1)		0,083333 3	0,271166
LC3-50 L (2:1) - PP-25	*	-8,66667	0,271166
LC3-50 R (2:1) - PP-25	*	-8,75	0,271166

* indica una diferencia significativa.



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

ANOVA Simple - Absorción de agua 7d por Tipo de cemento

Variable dependiente: Absorción de agua 7d

Factor: Tipo de cemento

Número de observaciones: 18

Número de niveles: 3

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Absorción de agua 7d.

Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de Absorción de

agua 7d para los 3 diferentes niveles de Tipo de cemento. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si le preocupa la presencia de valores atípicos, puede elegir la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias.

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

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,60498	2	1,30249	9,50	0,0022
Intra grupos	2,05598	15	0,137066		
Total (Corr.)	4,66096	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Absorción de agua 7d en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 9,50267, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Absorción de agua 7d entre un nivel de Tipo de cemento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla de Medias para Absorción de agua 7d por Tipo de cemento con intervalos de confianza del 95,0%

Tipo de cemento	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
LC3-50 L (2:1)	6	2,17833	0,151143	1,95054	2,40613
LC3-50 R (2:1)	6	2,205	0,151143	1,9772	2,4328
PP-25	6	1,385	0,151143	1,1572	1,6128
Total	18	1,92278			

Esta tabla muestra la media de Absorción de agua 7d para cada nivel de Tipo de cemento. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

Pruebas de Múltiple Rangos para Absorción de agua 7d por Tipo de cemento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tipo de cemento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
PP-25	6	1,385	X
LC3-50 L (2:1)	6	2,17833	X
LC3-50 R (2:1)	6	2,205	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
LC3-50 L (2:1) - LC3-50 R (2:1)		- 0,026666 7	0,455596
LC3-50 L (2:1) - PP-25	*	0,793333	0,455596
LC3-50 R (2:1) - PP-25	*	0,82	0,455596

* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Resultados Gráficos:

