

La tesis de maestría titulada “Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas” presentada por el Ingeniero Andrés Felipe Espitia Morales, cumple con los requisitos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Ingeniería Estructural

Nancy Torres Castellanos, PhD

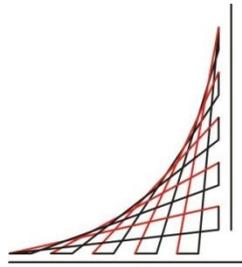
Directora de tesis

Angelica Chica Segovia, PhD

Jurado

Ismael Santana Santana, M.Sc

Jurado



ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

Andrés Felipe Espitia Morales

Escuela Colombiana de Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2018

Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

Andrés Felipe Espitia Morales

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural

Directora:

I.C., M.Sc., Ph.D. Nancy Torres Castellanos

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2018

*“Lo poco que he aprendido carece de valor,
comparado con lo que ignoro y no desespero
en aprender”*

René Descartes

Agradecimientos

En primer lugar, quiero darles las gracias a mis padres, Fabio y Hermencia, por su apoyo incondicional durante la ejecución de este estudio y en las diferentes etapas de mi vida. Gracias por darme fortaleza en todo momento y por la disciplina que me han inculcado para soñar y llegar más lejos. Este proyecto es una razón más para demostrarles que me siento orgulloso de ser su hijo y de querer ser mejor día a día.

A mi directora de tesis, la ingeniera Nancy Torres, quiero darle las gracias por la confianza que depositó en mí, por su colaboración en el desarrollo de esta investigación y por la transmisión de tantos conocimientos, que me permitieron querer más la rama relacionada con materiales de construcción y con las estructuras en general. Gracias por su dedicación y empeño, al hacer de este proyecto un aporte para profesionales que guarden interés en el tema de estudio, y para estudiantes que deseen aprender y complementar su formación.

Gracias a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, mi alma máter y mi segundo hogar. Sin el apoyo recibido, no habría sido posible la ejecución de este estudio. Siempre me sentiré orgulloso de haber estudiado en la institución, y hoy en día ser docente en pregrado. También deseo manifestar mi agradecimiento con mis profesores de posgrado, por tantos conocimientos que me transmitieron y por ser modelos a seguir. Las enseñanzas que recibí las transmitiré con honor a mis estudiantes.

También quiero darle gracias al personal del centro de Estudios de Estructuras. A María Isabel Espejo, gracias por su paciencia con tantas impresiones y fotocopias que necesité; también por su ayuda con la solicitud de ensayos especiales. A Jairo Páez, le agradezco mucho por pulirme en la preparación de cubos de mortero y, por ayudarme en los ensayos de fluidez. A Ramón Torres, Cristian Cogollo y Luis Beltrán, quiero agradecerles

por su apoyo en el montaje y ensayo de las muestras fabricadas, y por sus ideas para facilitar algunas tareas. De igual manera no puedo dejar de lado a mis compañeros del laboratorio; a David Calderón le agradezco por amenizar la redacción de este documento con un género musical que no es de mi gusto, y por las ideas que aportó. A Andrés González le doy las gracias por sus conversaciones y entusiasmo. A Andrés Muñoz, por compartir la afición por casi un mes a la música de Two Steps from Hell y por sus consejos. A Laura Valderrama le doy las gracias por su apoyo y la tomo como referencia para ser mejor cada día. A mis estudiantes les debo la fortaleza y entusiasmo que me dieron, sin siquiera ellos saberlo; hoy les puedo decir que transmitirles lo que he aprendido en mi profesión, me ayudó a querer más la ingeniería y a dejarles un legado que espero les sea de utilidad en el futuro.

Tampoco puedo dejar de lado a quienes hicieron de este proyecto una realidad. Por esta razón me siento muy agradecido con la empresa Insumos Industriales Corona, por facilitarme el metacaolín que utilicé como adición. A la empresa Armastek, por su interés y donación de las barras de GFRP que se utilizaron como refuerzo en la mampostería y a Sika Colombia S.A., por el epóxico Sikadur 30, requerido para embeber las barras en las juntas de la mampostería.

Por último, quisiera darles las gracias a las personas que en algún momento me brindaron su apoyo, y por cuestiones de la vida ya no se encuentran en mi presente. Gracias a ustedes por sus aportes y por la fortaleza que me brindaron en momentos difíciles y por hacer de mí una mejor persona.

Resumen

En diferentes países, especialmente en el continente europeo, se han desarrollado investigaciones relacionadas con mampostería de arcilla cocida sentada en morteros de cal y arena, materiales típicos de edificaciones patrimoniales. Estas investigaciones se han llevado a cabo con el fin de evaluar su vulnerabilidad estructural y tomar acciones de reparación y reforzamiento. Por esta razón, es necesario preservarlas, dado su valor cultural y, debido a que en muchas ocasiones se presentan problemáticas estructurales por acciones naturales o por intervenciones indebidas por parte del hombre, lo cual lleva a buscar sistemas de reforzamiento que mejoren la resistencia de los inmuebles, minimizando posibles alteraciones en la arquitectura original.

De acuerdo a lo anterior, el presente documento presenta la caracterización de mezclas de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y la evaluación de su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida. También plantea el uso de dos sistemas de reforzamiento, poco invasivos, que buscaban mejorar el comportamiento mecánico de la mampostería.

Para el desarrollo de la metodología experimental, inicialmente se fabricaron setenta y dos cubos de morteros de cal y arena, de los cuales algunos se encontraban adicionados con metacaolín o polvo de ladrillo. Del mismo modo, la mitad de las muestras fueron sometidas a un proceso de carbonatación acelerada, para simular un proceso de envejecimiento en las mezclas, debido a que este tipo de morteros aumenta su resistencia a medida que se carbonata con el CO_2 presente en el ambiente. Al mismo tiempo, se ejecutaron ensayos de carbonatación acelerada, en nueve muestras cilíndricas de mortero, con el objetivo de determinar la constante de carbonatación de dichas mezclas. Con los resultados obtenidos, se seleccionó el mortero que presentara una resistencia similar a la encontrada en morteros patrimoniales, y con éste, se construyeron muestras de mampostería. Para el reforzamiento de la mampostería, se

utilizaron dos metodologías: reforzamiento con malla electrosoldada embebida en mortero de cal y arena y barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer por sus siglas en inglés), embebidas en las juntas del sistema. Adicional a lo anterior, se caracterizaron los materiales restantes por separado: unidades cerámicas, malla electrosoldada y las barras de GFRP.

La investigación demostró que los sistemas de reforzamiento mejoraron las propiedades mecánicas de la mampostería, mejorando en algunos casos la resistencia a compresión. Además, resultaron ser metodologías poco invasivas desde el punto de vista arquitectónico, lo cual es clave para los profesionales que se dedican a la rehabilitación de estructuras patrimoniales. También se corroboró que al utilizar el metacaolín como adición cementante, se obtuvieron aumentos significativos de la resistencia al corto plazo en los morteros.

Palabras clave: Mortero, cal, metacaolín, polvo de ladrillo, mampostería, reforzamiento, malla electrosoldada, barras de FRP.

Abstract

In many countries, especially in Europe, different investigations have been developed, related with fire clay masonry built with lime mortars, used in ancient buildings. These structures have high cultural values, and they must be preserved. Nevertheless, sometimes these constructions present structural problems due to natural factors or incorrect human actions, making necessary the search of new reinforcement systems that improve the resistance of buildings, reducing architectural modifications in the original project.

This document presents the characterization of lime mortars, compatibles with ancient mixes and their incidence in mechanical properties of fire clay masonry. This work proposes two methods for non-invasive reinforcement, trying to improve the mechanical behavior of masonry.

For the development of the experimental methodology, seventy two of lime mortars were made. Some of them were added with metakaolin and brick dust. Similarly, half of the samples were subjected to an accelerated carbonation process, simulating aging process in the mixes, because these mortars improve their resistance with the CO₂ of the atmosphere. At same time, accelerated carbonation tests were performed in nine cylindrical samples, trying to determinate carbonation rate of mortars. With the results, the mortar with a resistance similar to ancient mortars was selected and it was used for the construction of masonry samples. For the reinforcement, two methods were used: reinforcement with welded mesh in lime mortar and FRP bars in the joints. Additionally, individual materials were tested: historic bricks, welded mesh and FRP bars.

The investigation proved that reinforcement systems used, improved mechanical properties of masonry, like axial resistance. Also these methods were non-invasive from a point of view of architecture. This is important for professionals that work in structural rehabilitation of heritage structures. The use of metakaolin as addition, showed improvements in short-term resistance of mortars.

Keywords: Mortar, lime, metakaolin, brick dust, masonry, reinforcement, welded mesh, FRP bars.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de fotografías	XVII
Lista de figuras.....	XXIII
Lista de gráficas	XXIV
Lista de tablas	XXVII
Introducción	1
1. MARCO TEÓRICO	7
1.1 Uso y evolución de morteros en la historia.....	8
1.1.1 Morteros en la Prehistoria	8
1.1.2 Morteros en Egipto	10
1.1.3 Morteros en Grecia	11
1.1.4 Morteros en Roma	12
1.1.5 Morteros en la Edad Media	13
1.1.6 Morteros islámicos	13
1.1.7 Morteros en la modernidad	14
1.1.8 Morteros en la actualidad	15
1.2 Cal.....	16
1.2.1 Ciclo de la cal.....	16
1.2.1.1 Fase I – Extracción de rocas.....	17
1.2.1.2 Fase II – Calcinación	17
1.2.1.3 Fase III – Apagado o hidratación	19

1.2.1.4	Fases IV y V – Carbonatación y carbonización.....	20
1.2.2	Tipos de cal	21
1.2.2.1	Cales aéreas	21
1.2.2.2	Cales hidráulicas	22
1.2.3	Proceso de carbonatación en la cal	23
1.2.3.1	Difusión del dióxido de carbono en el mortero	24
1.2.3.2	Condensación de agua en los poros.....	24
1.2.3.3	Disolución del hidróxido de calcio.....	24
1.2.3.4	Disolución del dióxido de carbono en la solución de poros	25
1.2.3.5	Precipitación de carbonato de calcio	25
1.2.4	Usos de la cal	25
1.2.5	Características de los morteros de cal	27
1.2.6	Cal en Colombia	28
1.3	Adiciones.....	30
1.3.1	Adiciones orgánicas.....	30
1.3.2	Adiciones inertes	31
1.3.3	Adiciones hidráulicas	31
1.3.4	Adiciones puzolánicas	31
1.3.5	Adiciones sintéticas	31
1.4	Metacaolín.....	32
1.4.1	Reacciones que se producen entre la cal y el metacaolín.....	33
1.5	Polvo de ladrillo	33
1.5.1	Reacciones que se producen entre la cal y el polvo de ladrillo	34
1.6	Uso y evolución de la mampostería en la historia.....	34
1.6.1	Mampostería en la prehistoria.....	34
1.6.2	Mampostería en Sumeria.....	35
1.6.3	Mampostería en Egipto.....	37
1.6.4	Mampostería en Roma	37
1.6.5	Mampostería en la Edad Media y el Renacimiento	39
1.6.6	Mampostería moderna.....	39
1.6.7	Mampostería en Colombia (Molina & Hinojosa, 2011)	42

1.7	Patrimonio	43
1.8	Conservación, restauración y reforzamiento de edificaciones patrimoniales..	44
1.8.1	Factores que afectan las edificaciones patrimoniales.....	44
1.8.2	Conservación y restauración	44
1.8.3	Problemática en la intervención del patrimonio arquitectónico	45
1.8.4	Fundamentos para la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico.....	46
1.8.5	Reforzamiento en edificaciones patrimoniales	47
1.8.5.1	Respeto a la originalidad estructural y mínima alteración.....	47
1.8.5.2	Seguridad estructural.....	48
1.8.5.3	Compatibilidad	48
1.8.5.4	Reversibilidad de las soluciones	50
1.8.6	Técnicas de reforzamiento	50
1.8.7	Metodología para intervenir el patrimonio arquitectónico.....	52
2.	ESTADO DEL ARTE	55
2.1	Estudios internacionales	55
2.1.1	Caracterización de morteros de cal y arena	55
2.1.2	Caracterización de morteros de cal, adicionados con metacaolín	59
2.1.3	Caracterización de morteros de cal, adicionados con polvo de ladrillo	62
2.1.4	Carbonatación en morteros de cal.....	64
2.1.5	Mampostería sentada en morteros de cal	67
2.1.6	Mampostería reforzada con cuerdas de acero.	69
2.1.7	Mampostería reforzada con FRCM	71
2.1.8	Mampostería reforzada con barras de FRP.....	74
2.2	Estudios nacionales.....	75
2.2.1	Caracterización físico-química y mineralógica de morteros de cal.....	75
2.2.2	Caracterización de ladrillo patrimonial sentado en mortero de cal y arena	77
3.	OBJETIVOS.....	83
3.1	Objetivo general.....	83
3.2	Objetivos específicos	83

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	85
4.1 Consulta bibliográfica	85
4.2 Caracterización de los materiales.....	85
4.2.1 Cal.....	86
4.2.2 Arena.....	86
4.2.3 Metacaolín	86
4.2.4 Polvo de ladrillo	86
4.2.5 Ladrillos patrimoniales	90
4.3 Diseño, preparación y caracterización de morteros	91
4.4 Elaboración y construcción de las muestras de ensayo.....	94
4.4.1 Cubos de mortero	94
4.4.2 Cilindros de mortero.....	97
4.4.3 Muretes de mampostería	100
4.5 Reforzamiento de muretes de mampostería	109
4.5.1 Caracterización de malla electrosoldada.....	109
4.5.2 Reforzamiento con malla electrosoldada	109
4.5.3 Caracterización de barras de GFRP	112
4.5.4 Reforzamiento con barras de FRP.....	113
4.6 Ensayos en muretes de mampostería	116
4.7 Identificación de las muestras de ensayo	116
4.7.1 Morteros	116
4.7.2 Unidades de mampostería	117
4.7.3 Muretes.....	117
5. RESULTADOS	119
5.1 Caracterización de la cal	119
5.2 Caracterización de la arena.....	120
5.3 Caracterización del metacaolín	123
5.4 Caracterización del polvo de ladrillo	124
5.5 Caracterización de las unidades cerámicas patrimoniales.....	126
5.5.1 Absorción en unidades cerámicas	126
5.5.2 Resistencia a compresión en unidades cerámicas.....	127
5.5.3 Módulo de rotura en unidades cerámicas	129

5.6	Caracterización de morteros	130
5.6.1	Resistencia a compresión	130
5.6.2	Profundidad de carbonatación.....	135
5.7	Caracterización del refuerzo de la mampostería	141
5.7.1	Malla electrosoldada	141
5.7.2	Barras de GFRP.....	142
5.8	Caracterización de la mampostería.....	143
5.8.1	Caracterización del mortero de pega.....	143
5.8.2	Resistencia a compresión en muretes de unidad y media.....	145
5.8.3	Módulo elástico en muretes de unidad y media.....	154
5.8.4	Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico, en muretes de unidad y media	159
5.8.5	Resistencia a compresión en muretes medianos	161
5.8.6	Módulo elástico en muretes medianos	165
5.8.7	Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico en muretes medianos.....	169
5.8.8	Compresión diagonal en muretes grandes.....	170
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	181
6.1	Conclusiones	181
6.2	Recomendaciones	184
6.3	Comentario final.....	186
A.	Anexo A: Composición química de la cal.....	187
B.	Anexo B: Caracterización de la arena.....	191
C.	Anexo C: Composición química del metacaolín	197
D.	Anexo D: Composición química y granulometría del polvo de ladrillo	201
E.	Anexo E: Absorción en unidades cerámicas	205
F.	Anexo F: Resistencia a compresión en unidades cerámicas	207
G.	Anexo G: Módulo de rotura en unidades cerámicas.....	209
H.	Anexo H: Resistencia a compresión de morteros	211

I. Anexo I: Profundidad de carbonatación en morteros	217
J. Anexo J: Caracterización de malla electrosoldada	221
K. Anexo K: Caracterización barras de GFRP	223
L. Anexo L: Resistencia a compresión en muretes de unidad y media	227
M. Anexo M: Módulo elástico en muretes de unidad y media	231
N. Anexo N: Resistencia a compresión en muretes medianos	253
O. Anexo O: Módulo elástico en muretes medianos	257
P. Anexo P: Esfuerzo cortante por compresión diagonal en muretes grandes....	267
Q. Anexo Q: Módulo de rigidez a cortante en muretes grandes	271
R. Anexo R: Ficha técnica de la cal.....	281
S. Anexo S: Ficha técnica de las barras de GFRP	283
T. Anexo T: Protocolo de diseño de morteros de cal y arena.....	285
Bibliografía	289

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 1-1 Ruinas de la ciudad de Ur (Irak)	9
Fotografía 1-2 Estuco en Chichén Itzá (México)	10
Fotografía 1-3 Templo de Amon (Karnak)	11
Fotografía 1-4 Ruinas en la isla de Delos	12
Fotografía 1-5 Mortero de revoque en Pompeya	13
Fotografía 1-6 Ciudadela de Bam (Irán)	14
Fotografía 1-7 Faro de Eddyston (Plymouth)	15
Fotografía 1-8 Extracción de roca caliza	17
Fotografía 1-9 Horno rotatorio vertical	18
Fotografía 1-10 Apagado de la cal	19
Fotografía 1-11 Zigurat	36
Fotografía 1-12 Mastaba egipcia	37
Fotografía 1-13 Flexión perpendicular al plano en muro de mampostería reforzada	42
Fotografía 1-14 Respeto a originalidad estructural y mínima intervención	48
Fotografía 1-15 Incompatibilidad de materiales en intervención patrimonial	49

Fotografía 2-1 Ensayo de flexión perpendicular al plano en muros reforzados con FRCM	73
Fotografía 4-1 Trituración de bloques	87
Fotografía 4-2 Bloque triturado	88
Fotografía 4-3 Máquina de Los Ángeles.....	88
Fotografía 4-4 Polvo de ladrillos antes de tamizar.....	89
Fotografía 4-5 Tamizado del polvo de ladrillo.....	89
Fotografía 4-6 Polvo de ladrillo para la investigación	90
Fotografía 4-7 Fluidez en morteros de cal.....	92
Fotografía 4-8 Fabricación de cubos de mortero.....	95
Fotografía 4-9 Desmolde de cubos de mortero	96
Fotografía 4-10 Curado de cubos en cámara de humedad y temperatura.....	97
Fotografía 4-11 Curado de cubos en cámara de carbonatación.....	97
Fotografía 4-12 Mezcla manual del mortero.....	98
Fotografía 4-13 Apisonado del mortero.....	99
Fotografía 4-14 Extracción de aire en el mortero	99
Fotografía 4-15 Almacenamiento de moldes de cilindros en cámara de humedad y temperatura	99
Fotografía 4-16 Impermeabilización de caras de cilindros de mortero.....	100
Fotografía 4-17 Base de madera para construir muretes	103
Fotografía 4-18 Corte de unidades cerámicas	103

Fotografía 4-19 Pesaje de la arena	104
Fotografía 4-20 Mezcla de los materiales	104
Fotografía 4-21 Mezcla manual de mortero	104
Fotografía 4-22 Inicio construcción murete de unidad y media	105
Fotografía 4-23 Inicio construcción murete mediano	105
Fotografía 4-24 Finalización construcción murete de unidad y media.....	105
Fotografía 4-25 Base de muretes grandes	106
Fotografía 4-26 Llenado de la base del murete grande con arena.....	106
Fotografía 4-27 Nivelación de la base de murete grande	107
Fotografía 4-28 Mezclado mecánico de mortero.....	107
Fotografía 4-29 Construcción murete grande	108
Fotografía 4-30 Murete grande.....	108
Fotografía 4-31 Grafiles utilizados para el anclaje de la malla electrosoldada	110
Fotografía 4-32 Perforación en mampostería para instalación de anclajes.....	110
Fotografía 4-33 Inyección de epóxico en los anclajes del refuerzo.....	111
Fotografía 4-34 Corte de las juntas de mampostería	113
Fotografía 4-35 Ubicación de las barras de FRP en las juntas de mampostería.....	114
Fotografía 5-1 Ensayo de resistencia a compresión en unidades de mampostería	128
Fotografía 5-2 Ensayo módulo de rotura en unidades de mampostería.....	129
Fotografía 5-3 Ensayo de resistencia a compresión en cubos de mortero.....	132
Fotografía 5-4 Corte de probetas para evaluar la profundidad de carbonatación.....	137

Fotografía 5-5 Avance del frente de carbonatación en morteros de cal.....	138
Fotografía 5-6 Tensión en alambre de la malla electrosoldada	141
Fotografía 5-7 Corte en la soldadura de la malla electrosoldada.....	141
Fotografía 5-8 Ensayo a tensión en barra de GFRP	142
Fotografía 5-9 Mecanismo de falla de murete de unidad y media, elaborado con mortero de cal y arena	147
Fotografía 5-10 Junta de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal, completamente carbonatada.....	147
Fotografía 5-11 Junta de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal, parcialmente carbonatada.....	148
Fotografía 5-12 Mecanismo de falla de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal adicionado con metacaolín, no reforzado	149
Fotografía 5-13 Fisuración del revoque en murete de unidad y media, reforzado con malla electrosoldada.....	149
Fotografía 5-14 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, reforzado con malla electrosoldada.....	150
Fotografía 5-15 Anclaje de la malla electrosoldada en murete de unidad y media	150
Fotografía 5-16 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, reforzado con barra de GFRP.....	151
Fotografía 5-17 Plano de falla en la cara reforzada con barra de GFRP en murete de unidad y media.....	151
Fotografía 5-18 Junta de mortero de cal adicionado con metacaolín, en murete de unidad y media	152

Fotografía 5-19 Junta de mortero de cal adicionado con metacaolín, en murete de unidad y media	153
Fotografía 5-20 Ensayo de resistencia compresión y módulo elástico, en muretes de unidad y media	155
Fotografía 5-21 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, no reforzado	162
Fotografía 5-22 Fisuración del mortero de revoque en murete mediano, reforzado con malla electrosoldada	163
Fotografía 5-23 Mecanismo de falla en murete mediano, reforzado con malla electrosoldada.....	163
Fotografía 5-24 Malla de refuerzo después de la falla del murete	164
Fotografía 5-25 Mecanismo de falla en murete mediano, reforzado con barras de GFRP	164
Fotografía 5-26 Plano de falla en cara reforzada con barras de GFRP, en murete mediano	165
Fotografía 5-27 Ensayo de resistencia a compresión y módulo elástico, en murete mediano	166
Fotografía 5-28 Ensayo de compresión diagonal en muretes grandes	171
Fotografía 5-29 Mecanismo de falla en muretes no reforzados, sometidos a compresión diagonal	172
Fotografía 5-30 Falla por adherencia en junta horizontal en murete no reforzado, durante la prueba de compresión diagonal.....	173
Fotografía 5-31 Registro de dos planos de falla diagonales en murete no reforzado, sometido a compresión diagonal	173
Fotografía 5-32 Mecanismo de falla en muretes reforzados con malla electrosoldada, sometidos a compresión diagonal	174

Fotografía 5-33 Fisuración del mortero de revoque, durante el ensayo de compresión diagonal en murete reforzado con malla electrosoldada	175
Fotografía 5-34 Desprendimiento del mortero de revoque de la mampostería	175
Fotografía 5-35 Mecanismo de falla en muretes reforzados con barras de GFRP, sometidos a compresión diagonal	176
Fotografía 5-36 Barra de GFRP flectada en una de las juntas, después del ensayo de compresión diagonal.....	177

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Ciclo de la cal.....	21
Figura 1-2 Tipos de cal.....	23
Figura 1-3 Campos de aplicación de la cal.....	27
Figura 1-4 Unidad de mampostería en barro, secada al sol.....	35
Figura 1-5 Muro romano grueso.....	38
Figura 1-6 Propuesta planteada por ICOMOS para intervención del patrimonio arquitectónico.....	53
Figura 2-1 Reforzamiento de mampostería con cuerdas de acero de alta resistencia	70
Figura 2-2 Configuración de muretes fabricados por Torres et al. (2016)..	79
Figura 4-1 Dimensiones murete de unidad y media.....	101
Figura 4-2 Dimensiones murete mediano.....	101
Figura 4-3 Dimensiones murete grande.....	102
Figura 4-4 Ubicación de anclajes para reforzamiento con malla electrosoldada a) muretes de unidad y media b) muretes medianos c) muretes grandes.....	112
Figura 4-5 Ubicación de barras de GFRP.....	115

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 1-1 Usos de la cal en Europa.....	26
Gráfica 1-2 Producción de cal en Colombia entre los años 1940 y 2016.....	30
Gráfica 2-1 Profundidad de carbonatación con concentración del 5% de CO ₂	66
Gráfica 2-2 Profundidad de carbonatación con concentración del 10% de CO ₂	67
Gráfica 5-1 Curvas granulométricas de la arena	122
Gráfica 5-2 Curva granulométrica del polvo de ladrillo	126
Gráfica 5-3 Absorción en unidades de mampostería.....	127
Gráfica 5-4 Resistencia a compresión de unidades de mampostería	128
Gráfica 5-5 Módulo de rotura en unidades de mampostería.....	130
Gráfica 5-6 Resistencia a compresión de morteros.....	133
Gráfica 5-7 Evolución de la resistencia a compresión de morteros	134
Gráfica 5-8 Profundidad de carbonatación	137
Gráfica 5-9 Resistencia a compresión de morteros de juntas de mampostería	144
Gráfica 5-10 Curvas de evolución de resistencia en morteros de las juntas de mampostería.....	144
Gráfica 5-11 Resistencia a compresión en muretes de unidad y media	153
Gráfica 5-12 Módulo elástico de muretes de unidad y media	156

Gráfica 5-13 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal, no carbonatados	156
Gráfica 5-14 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal, carbonatados	157
Gráfica 5-15 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados.....	157
Gráfica 5-16 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada	158
Gráfica 5-17 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP	158
Gráfica 5-18 Correlación entre f'_m y E_m , para muretes de unidad y media	160
Gráfica 5-19 Resistencia a compresión en muretes medianos	161
Gráfica 5-20 Módulo elástico de muretes mediano.....	166
Gráfica 5-21 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados	167
Gráfica 5-22 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada	167
Gráfica 5-23 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP.....	168
Gráfica 5-24 Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico en la mampostería	169
Gráfica 5-25 Esfuerzo cortante máximo, obtenido en pruebas de compresión diagonal	171
Gráfica 5-26 Módulo de rigidez a cortante en muretes grandes.....	178
Gráfica 5-27 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes no reforzados	178

Gráfica 5-28 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes reforzados con malla electrosoldada 179

Gráfica 5-29 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes reforzados con barras de GFRP 179

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Producción de caliza en Colombia por departamento.....	29
Tabla 1-2 Técnicas tradicionales de reforzamiento.....	50
Tabla 1-3 Técnicas modernas de reforzamiento.....	51
Tabla 2-1 Composición mineralógica de tres tipos de metacaolín	59
Tabla 2-2 Propiedades mecánicas en mampostería	68
Tabla 2-3 Resistencia a compresión diagonal en mampostería reforzada con cables de acero de alta resistencia.....	70
Tabla 2-4 Propiedades físicas y mecánicas en unidades de arcilla patrimoniales.	78
Tabla 2-5 Propiedades mecánicas en muretes obtenidos en edificaciones patrimoniales.	78
Tabla 2-6 Resistencia a compresión de morteros de cal, carbonatados y no carbonatados	80
Tabla 2-7 Propiedades de unidades de mampostería patrimonial	80
Tabla 2-8 Propiedades de mampostería patrimonial, sentada en mortero de cal y arena	81
Tabla 4-1 Resumen de ensayos en unidades de mampostería patrimonial	91
Tabla 4-2 Proporciones seleccionadas para los morteros	91
Tabla 4-3 Dosificación de mezclas de mortero	93

Tabla 4-4 Resumen de ensayos en morteros.....	94
Tabla 4-5 Cuantía de refuerzo horizontal en muretes.....	115
Tabla 4-6 Resumen de ensayos en unidades de mampostería patrimonial.....	116
Tabla 5-1 Composición química de la cal.....	119
Tabla 5-2 Granulometría de la arena	121
Tabla 5-3 Propiedades de la arena	122
Tabla 5-4 Composición química del metacaolín	123
Tabla 5-5 Composición química del polvo de ladrillo.....	124
Tabla 5-6 Análisis granulométrico del polvo de ladrillo	125
Tabla 5-7 Resistencia a compresión de morteros	132
Tabla 5-8 Constantes de carbonatación acelerada, estimadas en morteros de cal	139
Tabla 5-9 Constantes de carbonatación natural, estimadas en morteros de cal.....	140
Tabla 5-10 Correlaciones entre f'_m y E_m , en muretes de unidad y media	160
Tabla 5-11 Correlaciones entre f'_m y E_m , en muretes medianos	169

Introducción

De acuerdo a la Ley 1185 de 2008, en el Artículo 4, “el patrimonio cultural de la Nación se encuentra constituido por todos los bienes materiales, las manifestaciones inmateriales, los productos y las representaciones de la cultura que son expresión de la nacionalidad colombiana”; entre dichos bienes, se encuentran los bienes de naturaleza mueble e inmueble, a los que se les atribuye especial interés histórico, artístico, científico, estético o simbólico en ámbitos como el plástico, arquitectónico, urbano, arqueológico, entre otros (Ministerio de Cultura, 2010). De igual manera, en el patrimonio inmueble se incluyen edificaciones, conjuntos arquitectónicos, asentamientos urbanos, obras de ingeniería, entre otros (Ministerio de Cultura y Patrimonio, 2005). Así mismo, en el Artículo 4 de la Ley 1185 de 2008, se encuentran los objetivos de la política estatal, relacionada con el patrimonio cultural de la Nación, donde se expresa la importancia de salvaguardar, proteger, recuperar, conservar, sostener y divulgar el patrimonio cultural (Ministerio de Cultura, 2010)

Con respecto a las edificaciones patrimoniales, estas comienzan a presentar deterioro en su estructura, entre otras por las siguientes causas: cambio del uso de la estructura (Mercado, 2007; Peñaranda, 2011), demolición parcial de las edificaciones (Peñaranda, 2011), asentamientos en la cimentación (Maldonado, Martín, & Maldonado, 2011), uso de materiales incompatibles con los originales (Forster, 2012), o simplemente por los efectos del paso del tiempo en la construcción (Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005). A raíz de las causas mencionadas, las edificaciones se ven vulnerables ante solicitaciones sísmicas (Borri, Castori, & Corradi, 2011; Peñaranda, 2011), y pueden presentar sobrecargas en la edificación, concentración de esfuerzos, aparición de fisuras, daño y desgaste de los materiales originales, lo cual se refleja en daños de los elementos del inmueble, o inestabilidad estructural, conllevando en algunos casos al colapso de la edificación, o a asumir sobrecostos en la ejecución de medidas

preventivas para la rehabilitación de la estructura; de igual modo, se pueden perder técnicas de construcción ancestrales.

Cuando se va a rehabilitar una edificación patrimonial de mampostería sentada en mortero de cal, el punto de inicio para la correcta selección de los materiales de reparación, se encuentra en analizar los materiales existentes (Forster, 2012, p. 204; Gleize, Motta, Silva, & Roman, 2009; Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005). Es importante tener en cuenta que las estructuras históricas poseen características constructivas y materiales que difieren de los actuales, por lo que puede existir incompatibilidad entre los materiales patrimoniales y los actuales (De La Rosa Ortiz, 2016; Iucolano, Liguori, & Colella, 2013); también se presentan variaciones en la composición, lo cual lleva a incertidumbres sobre las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos los materiales (Ball, El-Turki, & Allen, 2011). Por lo anterior, se justifica la necesidad de buscar materiales compatibles con los existentes en las edificaciones patrimoniales en estudio (Gleize et al., 2009; Lanas & Alvarez, 2003; Lanas, Pérez Bernal, Bello, & Alvarez, 2006; Moropoulou, Bakolas, Moundoulas, Aggelakopoulou, & Anagnostopoulou, 2005).

Por otra parte, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de mampostería, es una problemática actual que tiene grandes consecuencias socioeconómicas, teniendo en cuenta que estas estructuras han sido diseñadas con poca, o ninguna resistencia ante fuerzas sísmicas (Borri et al., 2011); adicionalmente, los diseñadores indican la importancia de obtener información precisa de los materiales que componen la mampostería no reforzada, con el fin de mejorar la precisión de los cálculos, optimizar costos, y realizar un diseño de reforzamiento eficiente (Lumantarna, 2012).

Para la conservación y rehabilitación de los inmuebles patrimoniales, es necesario buscar materiales que sean compatibles con los utilizados en la construcción de edificaciones patrimoniales, además, la información sobre el comportamiento de la mampostería con mortero de cal es escasa (Costigan, Pavía, & Kinnane, 2015). De igual manera, las cales actuales presentan ciertos problemas, como baja adherencia, alta retracción y poca cohesión entre los morteros alrededor de la mampostería, los cuales pueden solucionarse utilizando adiciones ricas en alumino-silicatos, como es el caso del metacaolín, el cual ha sido aceptado por los profesionales dedicados a la restauración de

edificaciones patrimoniales (Nežerka, Antoš, Litoš, Tesárek, & Zeman, 2016). Otro material que contribuye a mejorar las propiedades de los morteros de cal, es el ladrillo triturado, y su uso para reparación y sustitución en morteros de cal, se encuentra en estudio, además, se haría un mejor manejo de los desperdicios de la industria cerámica, ya que el 30% de los productos que se producen, no resultan aptos para ser utilizados en construcción (Matias, Faria, & Torres, 2014).

Otro aspecto importante, es el largo tiempo de fraguado y envejecimiento de los morteros de cal, generado por la reacción del dióxido de carbono del ambiente, con el del hidróxido de calcio del mortero, produciéndose la carbonatación, (De La Rosa Ortiz, 2016; Pavlík, Benešová, Matiašovský, & Pavlíková, 2012). Adicional a lo anterior, la tasa de carbonatación, es uno de los factores que afectan positivamente las propiedades de resistencia y durabilidad de los morteros de cal (Pavlík et al., 2012), por lo cual, resulta de gran interés evaluar las propiedades finales del mortero, sometiéndolo a un proceso de carbonatación acelerada, con condiciones ambientales controladas, lo cual permitiría predecir las características de las mezclas al largo plazo.

Por otro lado, también es de gran interés la evaluación de alternativas de reforzamiento de edificaciones patrimoniales, con la finalidad de valorar su compatibilidad con los materiales existentes, y tener nuevos conocimientos de los aportes de resistencia que le brindan a la estructura original, sin dejar de lado la caracterización de los materiales de forma individual, ya que las propiedades de estos influyen en las características del ensamble, unidad-mortero (Lumantarna, 2012). Así mismo, al reforzar la mampostería histórica, se aumentaría su resistencia al corte, factor que prevalece en las condiciones de estabilidad de una estructura, previniendo posibles colapsos (Borri et al., 2011), garantizando la seguridad de sus ocupantes, y también, la preservación del patrimonio histórico.

De acuerdo a lo anterior, el presente proyecto de investigación buscó analizar mezclas de cal y arena, compatibles con morteros históricos y, utilizarlos para la fabricación de ejemplares de mampostería histórica, evaluando sus propiedades mecánicas. De igual manera, se midió la tasa de carbonatación de diferentes morteros de cal y arena, para evaluar su resistencia al largo plazo en la mampostería.

La metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, se compuso de dos etapas: la primera consistió en una búsqueda bibliográfica y la segunda, en el desarrollo del programa experimental. Adicionalmente, este documento se compone de seis capítulos, descritos a continuación.

En el capítulo uno se expone el marco teórico, discutiendo el uso y evolución de morteros en la historia, datos relacionados con la cal, el uso de adiciones, un recuento del uso de la mampostería en la historia, la definición de patrimonio y temas relacionados con la conservación, restauración y reforzamiento de edificaciones patrimoniales.

En el segundo capítulo se presenta el estado del arte, compuesto por diferentes investigaciones que han realizado diferentes autores en temas relacionados con morteros de cal y arena, uso de adiciones como metacaolín y polvo de ladrillo, evaluación del proceso de carbonatación en morteros de cal, mampostería sentada en mortero de cal y técnicas de reforzamiento en mampostería histórica. Asimismo, los estudios consultados permitieron definir los objetivos del proyecto, teniendo uno general y siete específicos. Estos se encuentran en el capítulo tres.

Por otro lado, en el capítulo cuatro se expone la metodología experimental del proyecto. En esta se plantean las variables a evaluar y los procedimientos de ensayo, de acuerdo a las normas técnicas requeridas. De igual manera, en este numeral se explican los procedimientos de caracterización de los materiales: cal, arena, metacaolín, polvo de ladrillo y ladrillos patrimoniales. Posteriormente se expone el proceso de diseño, preparación y caracterización de los morteros fabricados para la investigación. Seguidamente, se muestra la construcción de los especímenes de ensayo, entre los que se encuentran cubos de mortero, cilindros de mortero y muretes de mampostería. Del mismo modo, se presenta el reforzamiento y la caracterización de las muestras de mampostería, finalizando con la identificación de las probetas de ensayo.

En el capítulo cinco, se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. Para esto, primero se presenta la caracterización de la cal, la arena, el metacaolín, el polvo de ladrillo, la malla electrosoldada y las barras de GFRP. Después de esto, se indican los registros en las unidades cerámicas. Posteriormente, se muestran los esfuerzos a compresión, a diferentes edades, de los morteros estudiados, con sus

correspondientes curvas de evolución de resistencia. También se muestran las constantes de carbonatación de las mezclas y las curvas de carbonatación proyectadas al largo plazo. Por último, se expone la caracterización mecánica de la mampostería reforzada y sin reforzar, incluyendo curvas esfuerzo-deformación a esfuerzos tanto axiales como transversales.

Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones obtenidas en la investigación. De igual manera, se incluyen algunas recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el tema presentado en este documento.

1.MARCO TEÓRICO

Este capítulo se concentra en la definición de diferentes conceptos y algunos datos históricos de interés, para ampliar la comprensión del tema relacionado con mampostería sentada en morteros de cal y arena, debido a que antes del siglo XX, eran frecuentes estos materiales en la construcción de diferentes estructuras (Pozo-Antonio, 2015), consideradas en la actualidad como patrimonio arquitectónico. Por esta razón, es crucial hacer una adecuada conservación y restauración de las edificaciones históricas, puesto que el uso de los materiales modernos puede resultar nocivo para éstas si no se tienen en cuenta algunas consideraciones especiales.

En primer lugar, se tratará el uso y la evolución de los morteros en la historia. Para esto se abordarán datos desde la prehistoria, pasando por el antiguo Egipto, la civilización griega, el Imperio Romano, la Edad Media, culturas islámicas, la época moderna, hasta nuestros días.

Posteriormente se hablará de la cal, su ciclo, tipología y el proceso de carbonatación con sus respectivas fases. Adicionalmente, se presentan los usos que se le dan al material en diferentes industrias, las características que presentan los morteros de cal e información del mercado de caliza en Colombia.

En tercer lugar, se presentará el tema relacionado con adiciones en morteros, incluyendo los tipos: orgánicas, inertes, hidráulicas puzolánicas y sintéticos. Asimismo, se discutirá sobre el metacaolín, adición de gran uso en la actualidad y que resulta compatible con los morteros de cal de la época; su proceso de producción y las reacciones químicas que se presentan con la cal en las mezclas y, se hablará del polvo de ladrillo y su interacción química con la cal.

Más adelante, se discutirá sobre el uso y la evolución de la mampostería a lo largo de la historia, desde la prehistoria, recorriendo la civilización sumeria, el antiguo Egipto, el Imperio Romano, la Edad Media, el Renacimiento y la edad moderna. De igual forma, se

hará una breve síntesis del uso de la mampostería en Colombia, durante el período de transición.

Finalmente, se definirá el patrimonio, teniendo en cuenta la Ley 1185 de 2008. En conjunto, se tratará sobre la conservación, restauración y reforzamiento de edificaciones patrimoniales. En esta última parte, se discutirán los factores que afectan el patrimonio arquitectónico, la problemática al intervenir edificaciones de este tipo y los fundamentos para conservar y restaurar estructuras históricas. También se hablará del reforzamiento y las técnicas empleadas en estructuras antiguas, para terminar con la metodología recomendada para intervenirlas.

1.1 Uso y evolución de morteros en la historia

A lo largo de la historia, el hombre ha hecho uso de diferentes materiales para construir estructuras, como es el caso de monumentos, viviendas, esculturas, entre otros; entre estos, se encuentran los morteros, los cuales han jugado un papel muy importante en la evolución de la arquitectura y la ingeniería. Dentro de las materias primas de los morteros se encuentra la cal, material utilizado desde tiempos remotos, incluso mencionado en la Biblia, donde dice *“Y el día que pases el Jordán (...), levantarás piedras grandes, y las revocarás con cal”* (Deuteronomio 27,2). Del mismo modo, la cal ha tenido diferentes aplicaciones durante milenios, e incluso, hoy en día se sigue utilizando por diferentes aspectos estéticos y técnicos, gracias a sus bondades. A continuación, se desarrolla una breve reseña sobre los morteros, y su evolución durante milenios, hasta nuestros días.

1.1.1 Morteros en la Prehistoria

Según Sersale (1991, citado por Cazalla, 2002), del período paleolítico (hace 2.5 millones de años hasta 10000 años) no existe evidencia de la utilización de materiales cementantes para unir rocas o unidades líticas. Milenios más adelante, en el neolítico y el eneolítico, considerados como los primeros años de la prehistoria, se descubrió el fuego, lo cual permitió calcinar rocas que al contacto con agua, endurecían (Cazalla,

2002); a partir de ese período, se evidencian los primeros morteros con arcilla, a los que se les añadía agua para brindarles manejabilidad, y posteriormente, secarlos al sol y al aire (Sersale, 1991, citado por Cazalla, 2002).

Los primeros rastros del uso de morteros se encuentran en la cultura de Jericó (Palestina), hacia el año 7 000 a.C. (Malinowski, 1981, citado por Cazalla, 2002), donde se encontraron huellas del uso de la cal en cisternas descubiertas (Gárate, 1994) y suelos fabricados con morteros de cal (Cazalla, 2002). De igual manera, en la villa neolítica de Catal Hüyük (actual Turquía), datada del año 6 000 a.C., se encontraron morteros de tierra adicionados con cenizas y restos de huesos negros, lo cual demostraba que no existía un material cementante como tal (Malinowski, 1981, citado por Cazalla, 2002). Asimismo, Gárate (1994) menciona la existencia de morteros de cal, utilizados en los suelos de casas en Djeitun (Turkmenistán), correspondientes al cuarto y tercer milenio antes de nuestra era. Otro suceso importante acaecido en la prehistoria, tiene que ver con el hallazgo de un horno de cal en Mesopotamia (actual Irak), el cual se remonta al año 2500 a.C. Ejemplos del uso de la cal en la misma zona geográfica, son el palacio asirio de Til Barsib (actual Siria), alrededor del año 1800 a.C. y la ciudad de Ur (actual Irak), donde se encontraron revoques con cal en sus paredes (Gárate, 1994). Del mismo modo, se utilizaba dicho material combinado con barro, para revestir paredes de templos, canales de agua, baños, aljibes, tumbas o viviendas (Usedo, 2016). En la Fotografía 1-1 se muestran las ruinas de la ciudad de Ur, y al fondo el zigurat de Ur-Nammu.



Fotografía 1-1 Ruinas de la ciudad de Ur (Irak)

Fuente: Tomado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Ur#/media/File:Ur-Nassiriyah.jpg>

10 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

Por otra parte, en América, la cultura maya hizo uso de la cal en estucos y decoraciones esculpidas, en templos ceremoniales como Copan, Palenque, Chichén Itzá (ver Fotografía 1-2), entre otros, en el período correspondiente a los años 300 y 900 d. C.. Posteriormente, esta tecnología sería heredada por los toltecas y los aztecas (Cazalla, 2002; Gárate, 1994). Del mismo modo, las culturas andinas del Perú utilizaron la cal combinada con asfalto, para morteros de mampostería y colorantes, y también mezclada con barro para la estabilización de adobes (Cazalla, 2002; Gárate, 1994).



Fotografía 1-2 Estuco en Chichén Itzá (México)

Fuente: Tomado de https://mundoatraves.files.wordpress.com/2013/04/dsc_0131.jpg

1.1.2 Morteros en Egipto

Los egipcios fueron los primeros en hacer uso del yeso como aglomerante, el cual cocían a 120 °C para obtener sulfato de calcio semihidratado, comúnmente conocido como escayola; dicho material, lo utilizaban en los morteros de las juntas entre los bloques de la pirámide de Keops (Cazalla, 2002; Gárate, 1994). El escaso uso de la cal por parte de la cultura egipcia, puede atribuirse a la escasez de materias primas para la combustión, requerida en el proceso de calcinación de las rocas calizas (Sersale, 1991; Ritchie, 1990, citados por Cazalla, 2002). Sin embargo, existe evidencia del uso de la cal como mortero en la construcción de las pirámides, durante la primera etapa del período egipcio, entre el cuarto y segundo milenio a.C. (Boynton, 1980, citado por Cazalla, 2002), y como soporte

de las pinturas en el interior de las pirámides (Usedo, 2016); otros autores como Watkins (1983, citado por Cazalla, 2002), atribuyen la aparición de la cal en los morteros de yeso, como una impureza. Siglos más tarde, en la época ptoloméica, se llevaron a cabo actividades de restauración y reconstrucción del Templo de Amón (ver Fotografía 1-3), donde se encontraron vestigios de la utilización de morteros de cal, probablemente por la influencia de invasiones griegas y romanas (Martinet et al., 1992, citados por Cazalla, 2002).



Fotografía 1-3 Templo de Amón (Karnak)

Fuente: Tomado de <http://megaconstrucciones.net/images/monumentos/foto/karnak-temple.jpg>

1.1.3 Morteros en Grecia

Los griegos fueron pioneros en el uso de la cal en morteros (Malinowski, 1981, citado por Cazalla, 2002), y su aplicación principal era el revestimiento en muros, a finales del siglo II e inicios del siglo I a.C., tal y como se evidencia en las casas de Delos (ver Fotografía 1-4) y Thera (Furlan y Bissegger, 1975, citados por Cazalla, 2002). En la isla de Santorini o Thera, se utilizó polvo volcánico como adición en los morteros helenísticos, los cuales contenían cal y arena fina (Cazalla, 2002). Debido a esto, se obtenían morteros estables al agua, con características análogas a las presentadas en morteros hidráulicos modernos (Gárate, 1994), reflejando el uso de puzolanas naturales en la antigüedad. Cuando no se disponía de roca volcánica, se empleaba teja o ladrillo triturado; los vestigios de su primer uso, datan del siglo X a.C., en la construcción de los

12 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

aljibes de Jerusalén (Gárate, 1994) , demostrando el uso de puzolanas artificiales en tiempos remotos. La costumbre del uso de puzolanas en los morteros de cal, fue heredada de los fenicios (Cazalla, 2002; Gárate, 1994), quienes manejaban y conocían de forma empírica puzolanas artificiales (Gárate, 1994).



Fotografía 1-4 Ruinas en la isla de Delos

Fuente: Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Delos#/media/File:Ancient_Delos.jpg

1.1.4 Morteros en Roma

En la cultura romana se presentaron mejoras en los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de aplicación de los morteros (Cazalla, 2002; Gárate, 1994), además, ésta supo explotar las cualidades del material, popularizándolo y expandiendo su uso por el imperio. El momento exacto en el que se introdujeron los morteros de cal en Roma es incierto, sin embargo, se tiene conocimiento de su uso en los dos últimos siglos a.C. (Gárate, 1994). Vitruvio, en sus Diez libros de Arquitectura describe los materiales utilizados en la fabricación de morteros de cal, indicando su aplicación, dosificaciones, entre otras (Cazalla, 2002). Del mismo modo, indica que la mezcla de los materiales se hacía en una proporción cal:arena de 1:3., o 2:5, dependiendo de la calidad de la arena, o de las adiciones (Cazalla, 2002; Gárate, 1994; Usedo, 2016), utilizadas antes por la cultura griega; entre estas, se encontraban cenizas volcánicas o materiales cerámicos triturados, para conferirle al mortero propiedades hidráulicas (Gárate, 1994). En la

Fotografía 1-5 se muestra un muro de mampostería con un mortero de revoque con cal y arena.



Fotografía 1-5 Mortero de revoque en Pompeya

Fuente: El autor

1.1.5 Morteros en la Edad Media

Desde la caída del Imperio Romano, no existen vestigios de ningún tipo de progreso técnico en los morteros (Cazalla, 2002; Gárate, 1994); adicionalmente, estos presentaban variaciones de un sitio a otro y diferencias de época (Gárate, 1994). Del mismo modo, las mezclas utilizadas presentaban baja calidad, poca homogeneidad, dosificación inadecuada de los materiales, fragilidad y mala aplicación de las mismas. Estos inconvenientes se atribuyen a la pérdida de los procedimientos utilizados por la cultura romana. Por último, a partir del siglo XII las mezclas recuperaron su homogeneidad y la calidad de los aglomerantes utilizados se mejoró nuevamente, entre ellos la cal (Cazalla, 2002; Gárate, 1994).

1.1.6 Morteros islámicos

En el período nazarí, tuvieron auge las yeserías o estucos “andalusí”, que consistían en morteros de cal y yeso (Cazalla, 2002; Gárate, 1994); como dato adicional, cabe resaltar que el yeso retarda el fraguado (Gárate, 1994). En la misma época, la cultura islámica

- 14 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas
-

introdujo el uso de la construcción conocida como “tapial”, frecuente en fortificaciones, que según Cazalla (2002), consistía en “una mezcla de tierra apisonada con cal ligeramente humedecida y colocada en un molde o encofrado que se revestía con mortero de cal”. En la Fotografía 1-6 se presenta la Ciudadela de Bam (Irán), donde se utilizaron técnicas de construcción en adobe y tapial.



Fotografía 1-6 Ciudadela de Bam (Irán)

Fuente: Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Arg-%C3%A9_Bam#/media/File:Fortaleza_de_Bam,_Ir%C3%A1n,_2016-09-23,_DD_17-19_PAN.jpg

1.1.7 Morteros en la modernidad

El hallazgo de los aglomerantes hidráulicos se dio en 1756, cuando el ingeniero John Smeaton se propuso encontrar una cal que lograra resistir la acción del agua de mar, y utilizarla en la construcción del faro de Eddystone (Inglaterra) (Cazalla, 2002; Gárate, 1994); en la Fotografía 1-7 se muestra dicha estructura. Los resultados químicos que obtuvo con una caliza de Avertan fueron positivos, concluyendo que “la presencia de arcilla en la caliza debe ser uno de los factores principales, si no el único que determina la hidráulica” (Gárate, 1994). Años después, alrededor de 1812, Vicat estudió mezclas de calizas puras y arcillosas, demostrando que las propiedades hidráulicas de los morteros, dependían de los componentes que se forman durante la cocción entre la

cal y los constituyentes de la arcilla (Cazalla, 2002; Gárate, 1994). Los primeros aglomerantes fabricados, usualmente presentaban las características de los cementos actuales, y las cales hidráulicas, que pueden considerarse como productos intermedios entre la cal hidratada y el cemento Portland (Cazalla, 2002; Gárate, 1994). Como último dato, en 1811, James Frost patenta un cemento artificial, obtenido de la calcinación de caliza molida y arcilla (Cazalla, 2002).



Fotografía 1-7 Faro de Eddystone (Plymouth)

Fuente: Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Faro_de_Eddystone#/media/File:Phare-d-Eddystone-Rocks.jpg

1.1.8 Morteros en la actualidad

En 1824, Joseph Aspdin realiza una patente para un cemento que dice “ser tan duro como la piedra de Portland” (Cazalla, 2002; Gárate, 1994), el cual se preparaba calcinando la caliza en una primera fase, para luego calcinar el óxido de calcio resultante y arcilla, y por último, repetir el proceso en la mezcla hidratada (Cazalla, 2002). Más adelante, en 1845, L. C. Johnson descubrió que el clinker, considerado como residuo, brindaba mejores resultados que el cemento convencional, bajo la condición de estar finamente molido. En la Exposición Universal, realizada en Londres en 1851, se realizó una demostración del producto, lo cual permitió su difusión (Cazalla, 2002; Gárate, 1994).

A partir del auge del cemento Portland, se utilizó en morteros en obras de restauración patrimonial, dejando de lado los morteros tradicionales de cal (Cañón, 2012; Cazalla,

2002). En consecuencia, se presentaron numerosos casos de daños irreparables en muros tradicionales (Cazalla, 2002). De igual manera, actualmente los morteros de cal se encuentran en un segundo plano, por lo que su uso, técnicas de aplicación, y mano de obra, se han ido perdiendo con el paso del tiempo (Fischer, 2000, citado por Cazalla, 2002; Usedo, 2016).

1.2 Cal

Cobarruvias (1611, citado por Gárate, 1994) define la cal como *“La piedra quemada convertida en blandos terrones que se desmoronan y vuelven polvo. Esta mezclada con la arena y es la trabazón de las piedras en los edificios”*. De igual forma, el Diccionario de la lengua española (RAE, 2017) la define como una *“sustancia alcalina constituida por óxido de calcio, de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del agua se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma la argamasa o mortero”*. En síntesis, el término cal se utiliza para describir todas las formas físicas en las que pueden aparecer el óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) e hidróxido de magnesio (Mg(OH)₂) (Luque, Cultrone, & Sebastián, 2010), siendo el aglomerante más utilizado en morteros tradicionales (Cazalla, 2002). En seguida, se explicará el ciclo de la cal, su proceso de carbonatación, los tipos de cal, su uso en la construcción, y las ventajas de utilizar morteros con dicho material.

1.2.1 Ciclo de la cal

Se conoce como ciclo de la cal a una serie de procesos que sufre el material, desde la extracción de su materia prima, hasta su utilización en obra (Cazalla, 2002). Tal ciclo, consta de cinco fases, la primera se refiere a la extracción de la materia prima y su trituración, seguido del proceso de calcinación. En tercer lugar, se apaga o hidrata el residuo obtenido de la calcinación; cabe resaltar que hasta este punto la cal ya tiene algunos usos, sin embargo, para el objeto del presente documento, la cuarta y quinta fase corresponden a morteros de cal como tal, donde se presenta la carbonatación y endurecimiento por carbonización respectivamente. A continuación, se explicarán con detalle cada una de las etapas.

1.2.1.1 Fase I – Extracción de rocas

La explotación de caliza se ejecuta a cielo abierto; su extracción puede realizarse por medio de máquinas excavadoras (ver Fotografía 1-8); sin embargo, las calizas son rocas duras, por lo cual, usualmente se emplean explosivos para fragmentarla. Cuando se requiere, los fragmentos de mayor tamaño se trituran previamente para reducirlos a un tamaño adecuado (Domínguez, 2000; González, 2000).



Fotografía 1-8 Extracción de roca caliza

Fuente: Tomado de <http://www.solancis.com/es/content/06-canteras/02-extraccion/giratoria.jpg>

1.2.1.2 Fase II – Calcinación

Este proceso consiste en la calcinación de la caliza a temperaturas altas, dependiendo de la composición química del material. Para rocas calcáreas puras, la temperatura de calcinación oscila entre 800 °C y 1200 °C, mientras que para calizas con impurezas o dolomíticas, el intervalo de cocción se encuentra entre 700 °C y 800°C (Cazalla, 2002). A pesar de la variación de temperaturas de cocción, dependientes de la naturaleza del agregado, otros autores plantean intervalos similares; Gárate (1994) especifica que el proceso se da hasta unos 900 °C o 1000 °C, mientras que Domínguez (2000) da valores entre 800 °C y 900 °C, y Bermúdez (2012) afirma que dicha variable debe ser superior a 900 °C. De este modo, la operación puede ejecutarse con diferentes tipos de hornos, ya sean rudimentarios, de cuba, rotatorio u horizontal y vertical (ver Fotografía 1-9) (González, 2000).



Fotografía 1-9 Horno rotatorio vertical

Fuente: Tomado de

http://www.lhoist.com/sites/lhoist/files/styles/square_thumbnail/public/id_230-vertical_kilns.jpg?itok=NWeBrMPO

En la fase de calcinación, se presentan diferentes procesos. Hasta 100 °C se presenta la pérdida de agua absorbida en cantera; hasta 700 °C se da la descomposición de los silicatos presentes en las arcillas de la caliza; por último, entre 800 °C y 1200 °C se disocia el carbonato de calcio o de magnesio (Cazalla, 2002; Gárate, 1994). Del mismo modo, es importante resaltar que a partir de 1000 °C, se presenta la reacción de productos resultantes como calcio (Ca), oxígeno (O), dióxido de sílice (SiO₂ o sílice) y óxido de aluminio (Al₂O₃ o alúmina)., dando como resultado la cal hidráulica (Gárate, 1994).

A nivel químico, con la energía térmica inducida en el proceso, se descompone el carbonato de calcio (CaCO₃), presente en la roca caliza en óxido de calcio (CaO), más conocido como cal viva, y dióxido de carbono (CO₂) (Gárate, 1994). La reacción química que se produce es la siguiente:



Ecuación 1-1

1.2.1.3 Fase III – Apagado o hidratación

La cal viva resulta ser bastante inestable, dificultando su manejo en construcción, pues tiende a absorber el agua del ambiente e incluso de cualquier ser vivo, lo cual la hace peligrosa si entra en contacto con la piel. Por dicha razón, se hace necesario el apagado o hidratación de la cal (Domínguez, 2000) (ver Fotografía 1-10), para lo cual existen varios sistemas. Una metodología para efectuar el proceso es realizarlo al aire, otra es por inmersión en agua por un período de tiempo corto; también se puede sumergir en agua en la obra, o pueden utilizarse aspersores (Cazalla, 2002; González, 2000).



Fotografía 1-10 Apagado de la cal

Fuente: Tomado de <http://www.estucos.es/wp-content/uploads/Apagado-de-Cal-y-batido.jpg>

Cuando la cal reacciona con el agua, se produce un aumento de volumen considerable, generándose al mismo tiempo una liberación importante de calor (Cazalla, 2002; González, 2000). De igual forma, existen varios factores que influyen en el apagado de la cal; por ejemplo la composición de la cal, la pureza de la misma, el tamaño de las partículas, la temperatura de hidratación, el tiempo de hidratación, la calidad del agua, entre otros (Cazalla, 2002).

En síntesis, el objetivo del apagado de la cal consiste en no dejar ningún rastro de cal sin apagar; de lo contrario, se generarían pérdidas de consistencia en los morteros y daños posteriores (Domínguez, 2000). Como se ha mencionado con anterioridad, cuando la cal viva entra en contacto con el agua, se genera una reacción química, donde el óxido de

calcio se transforma en hidróxido de calcio, el cual recibe el nombre de cal apagada o hidratada (Cazalla, 2002; Domínguez, 2000; González, 2000). La reacción química que se produce es la siguiente:

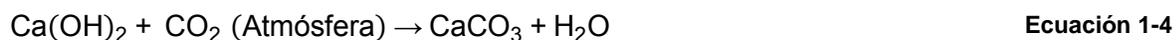


1.2.1.4 Fases IV y V – Carbonatación y carbonización

Las dos últimas etapas del ciclo de la cal, se relacionan directamente con los morteros, los cuales son el resultado de la mezcla de la cal apagada, arena y agua, en diferentes dosificaciones (Cañón, 2012). El proceso consiste en el endurecimiento del mortero por secado y la reacción con el dióxido de carbono presente en la atmósfera, lo cual genera una serie de cambios en la microestructura del mortero (Cazalla, 2002). En resumen, dicho fenómeno se debe a la reacción del hidróxido de calcio presente en la cal apagada, el sílice presente en la arena, el agua, y el dióxido de carbono presente en la atmósfera, obteniendo carbonato de calcio, agua y dióxido de sílice, a partir de la siguiente reacción química (Cañón, 2012):



La etapa que se presenta conjuntamente con la carbonatación del mortero, recibe el nombre de carbonización (Brostow, 1981, citado por Cañón, 2012). En este proceso, el exceso de agua comienza a secarse, dando inicio al fraguado y endurecimiento por la acción del dióxido de carbono (Cañón, 2012), lo cual se refleja en la transformación del hidróxido de calcio en carbonato de calcio, de acuerdo a la siguiente reacción:



De acuerdo a lo anterior, se completa el ciclo de la cal, el cual parte del carbonato de calcio (Cañón, 2012) presente en las rocas calizas, y termina en el mismo compuesto, pero manipulado por el hombre, considerado como uno de los grandes pasos de la humanidad (Gárate, 1994). En la Figura 1-1 se presenta el ciclo descrito.

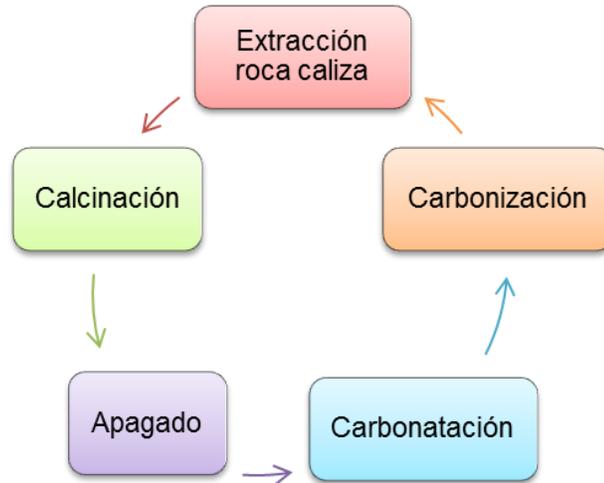


Figura 1-1 Ciclo de la cal

Fuente: El autor

1.2.2 Tipos de cal

A partir de la calidad de la roca caliza utilizada, se tienen dos grandes grupos de tipos de cal. El primero corresponde a las cales aéreas, mientras que el segundo a cales hidráulicas (González, 2000). A continuación se expondrán dichas clases, tomando como referencia las definiciones de la norma europea UNE_EN 459-1, considerando el trabajo de Usedo (2016) y lo expuesto en la página web de la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE, s/f-b).

1.2.2.1 Cales aéreas

Las cales aéreas son producidas a partir de la calcinación de rocas calizas o dolomías, compuestas principalmente por óxido o hidróxido de calcio y/o magnesio (Cazalla, 2002; Usedo, 2016), con contenidos de materiales arcillosos menores al 5% (González, 2000). Se caracterizan por su carencia de propiedades hidráulicas, ya que no tienen las características para fraguar y endurecer con el agua (Usedo, 2016), por lo que esta clase de aglomerante, se combina y endurece con el CO_2 presente en la atmósfera (ANCADE, s/f-b; Cazalla, 2002)- Debido a esto, su endurecimiento es muy lento, desde unos años, hasta siglos. De igual manera, los morteros elaborados con cales aéreas, presentan grandes retracciones (Cazalla, 2002).

De acuerdo con la composición química, las cales aéreas se subdividen en dos tipos. El primero de ellos, corresponde al material con contenido de CaO mayor al 95% y MgO menor al 5%, por lo que reciben el nombre de cales cálcicas o grasas. La segunda tipología, se refiere a los aglomerantes con contenidos de MgO superiores al 5%, y se denominan como cales dolomíticas, magras grises o áridas (Cazalla, 2002; González, 2000; Usedo, 2016).

En cuanto a su presentación, se encuentran como cales vivas o hidratadas. Las primeras se encuentran principalmente en forma de óxido, el cual reacciona exotérmicamente al contacto con el agua. Las cales hidratadas, se componen principalmente en forma de hidróxido, y se produce al apagar de forma controlada la cal viva (ANCADE, s/f-b).

1.2.2.2 Cales hidráulicas

Este tipo de cales se producen a partir de la calcinación de rocas calizas con contenidos de arcillas ricas en sílice, aluminio y hierro (González, 2000; Usedo, 2016). A diferencia de las cales aéreas, esta clase se destaca por la propiedad de fraguar y endurecer con el agua. Sin embargo, el proceso de endurecimiento también se ve influenciado por el CO₂ presente en el aire. Para esta categoría, el endurecimiento se presenta más rápido debido a la reacción de los silicatos y aluminatos con el agua, lo que da lugar a silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, de forma análoga a lo que ocurre con el cemento (ANCADE, s/f-b).

Dentro del grupo de las cales hidráulicas, se definen tres subclases. La primera concierne a las cales hidráulicas naturales (NHL), que son producto de la calcinación de calizas más o menos arcillosas o silíceas. En la segunda subcategoría se encuentran las cales formuladas (FL), las cuales se encuentran constituidas primordialmente por cal aérea y/o cal hidráulica natural con material hidráulico o puzolánico. Por último, están las cales hidráulicas artificiales (HL), compuestas por cal y otros materiales como cemento, cenizas volantes, entre otros (ANCADE, s/f-b; Usedo, 2016).

De lo anterior, en la Figura 1-2 se presentan las tipologías de cal, y sus subcategorías.

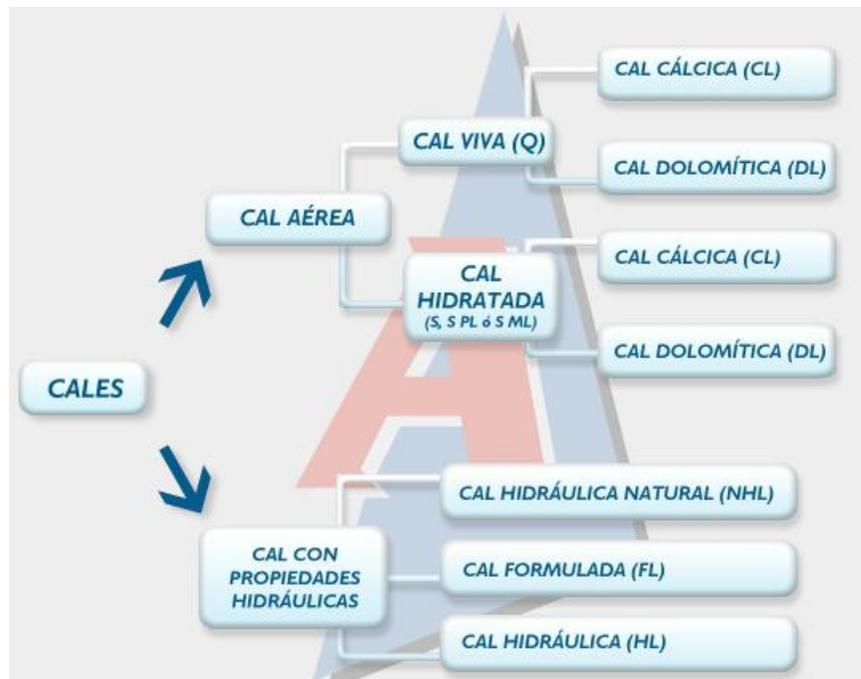


Figura 1-2 Tipos de cal

Fuente: Tomado de http://www.ancade.com/La-Cal_es_23.html

1.2.3 Proceso de carbonatación en la cal

Como se mencionó con anterioridad, el proceso de endurecimiento de los morteros de cal, se desarrolla por la reacción del dióxido de carbono presente en la atmósfera, con el hidróxido de calcio de la cal apagada (Pavlík et al., 2012), y se representa como la cantidad de hidróxido de calcio, o portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se transforma en carbonato de calcio (CaCO_3), también conocido como calcita (Anna Arizzi, Martínez Martínez, Cultrone, & Benavente, 2011; Luque et al., 2010). Igualmente, la tasa de carbonatación es un factor decisivo que influye en la resistencia y durabilidad de los morteros de cal (Pavlík et al., 2012), pues la reacción que se produce genera modificaciones en la estructura del mortero (Arandigoyen & Alvarez, 2006; Cazalla, 2002).

Durante la carbonatación, se presentan diferentes etapas, las cuales varían dependiendo de los estudios y análisis realizados por diferentes investigadores. Es así como, Papadakis et al. (1991, citados por Cazalla, 2002) describen siete fases; Dheilily y Tудо (1998, citados por Pavlík et al., 2012) mencionan cinco, mientras que (Arandigoyen & Alvarez, 2006) consideran seis. Pese a que el número de procesos varía según los

investigadores, en general se presentan cinco, los cuales se explicarán con detalle a continuación.

1.2.3.1 Difusión del dióxido de carbono en el mortero

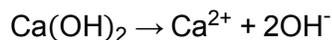
La primera etapa que se presenta durante la carbonatación, corresponde a la difusión del CO₂ a través de la estructura de poros del material (Arandigoyen & Alvarez, 2006), y es una de las fases más importantes, ya que puede ser el factor limitante del proceso de carbonatación. Dicha propagación, se ve ampliamente influenciada por la estructura del mortero, ya que es función del diámetro de poros y del recorrido medio, entre moléculas (Arandigoyen & Alvarez, 2006).

1.2.3.2 Condensación de agua en los poros

En esta fase se establece un equilibrio entre el dióxido de carbono atmosférico y el que se encuentra disuelto en agua (Arandigoyen & Alvarez, 2006), el cual se condensa en las paredes de los poros, en equilibrio con la temperatura y la humedad del ambiente (Papadakis et al., 1991, citados por Cazalla, 2002). En este proceso es de suprema importancia la cantidad de agua presente en el mortero, puesto que ésta se relaciona con la humedad del ambiente (Arandigoyen & Alvarez, 2006).

1.2.3.3 Disolución del hidróxido de calcio

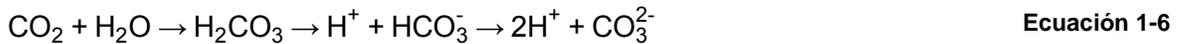
En este proceso se presenta la disolución del Ca(OH)₂ en la solución de poros. En consecuencia, se propagan iones de calcio (Ca²⁺) e hidróxido (OH⁻), disueltos (Papadakis et al., 1991, citados por Cazalla, 2002; Pavlík et al., 2012). La reacción se ve afectada por la cantidad de agua y por la microestructura del mortero (Arandigoyen & Alvarez, 2006), y se describe mediante la siguiente ecuación:



Ecuación 1-5

1.2.3.4 Disolución del dióxido de carbono en la solución de poros

Cuando se alcanza el equilibrio químico de la reacción del CO_2 en la solución de poros, éste reacciona con el agua presente, formando ácido carbónico (H_2CO_3) (Arandigoyen & Alvarez, 2006; Pavlík et al., 2012). El H_2CO_3 se descompone en iones hidrógeno (H^+) y carbonato (CO_3^{2-}), de acuerdo a la siguiente reacción:



1.2.3.5 Precipitación de carbonato de calcio

Por último, de la disolución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se presenta una difusión de iones de calcio, y de la disolución del CO_2 se obtienen iones de carbonato, lo que lleva a una precipitación de CaCO_3 , y la formación de cristales de calcita (Arandigoyen & Alvarez, 2006), lo cual se refleja en una reducción del volumen de poros por los productos de la carbonatación (Cazalla, 2002). La ecuación que describe dicho fenómeno es la siguiente:



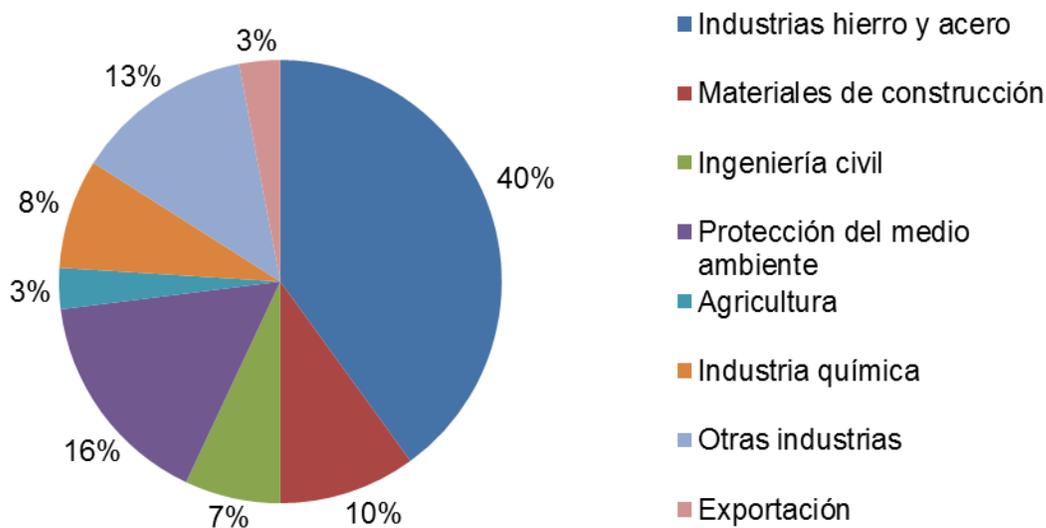
En resumen, el proceso de carbonatación se representa como la transformación de portlandita en calcita, debido al CO_2 presente en la atmósfera. Dicha conversión también genera un incremento en la masa y el volumen de las partículas endurecidas (Pavlík et al., 2012). La reacción que describe el proceso completo es la siguiente:



1.2.4 Usos de la cal

Los diferentes tipos de cal tienen aplicaciones en el mercado, por lo que estas varían dependiendo de la actividad. En Europa, de acuerdo al Informe de Actividades entre 2015 y 2016, dispuesto por la Asociación Europea de Cal (EuLA por sus siglas en inglés), el 40% del consumo de cal se destinó al sector de la industria del hierro y el acero y el 10% de la producción de cal se destinó para materiales de construcción. Para el caso de aplicaciones en ingeniería civil, su empleo fue del 7%. Para usos como protección del

medio ambiente, el gasto fue del 16%. En agricultura, se utilizó un 3%, mientras que en la industria química un 8%. Por último, en otras industrias y en exportación, la producción fue del 13% y 3% respectivamente (The European Lime Association, 2016). En la Gráfica 1-1 se presentan los porcentajes mencionados.



Gráfica 1-1 Usos de la cal en Europa

Fuente: El autor, de acuerdo a información del informe de EuLA (2016)

Por otra parte, en el sector de la construcción se utilizan cales aéreas e hidráulicas. En infraestructura se utilizan para la estabilización de suelos, mientras que en edificaciones, se emplean para fabricar morteros, revoques, pinturas, concretos celulares, ladrillos silico-calcáreos y bloques de tierra comprimida (ANCADE, s/f-a). En síntesis, en la Figura 1-3 se presentan los campos de aplicación de la cal, y los tipos de cal usuales en la construcción.

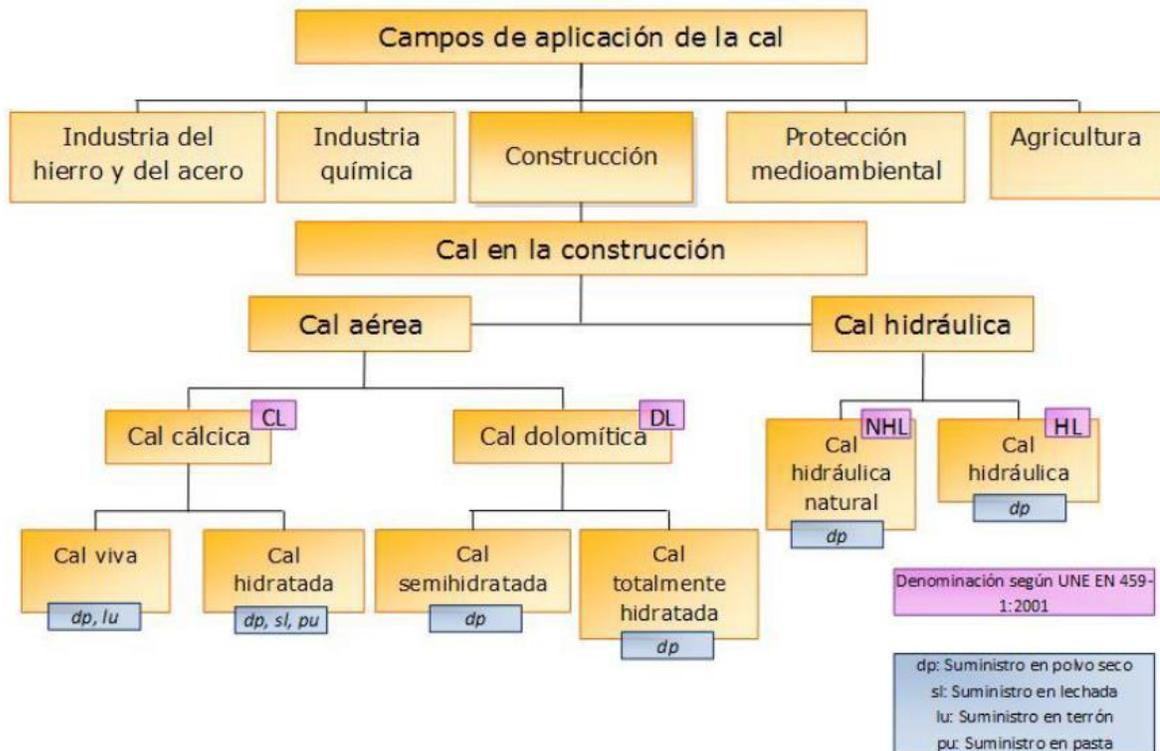


Figura 1-3 Campos de aplicación de la cal

Fuente: Tomado de (Usedo, 2016, p. 20)

1.2.5 Características de los morteros de cal

Los morteros de cal, presentan diferentes características que los hacen apropiados para su uso en la construcción y como se verá más adelante, para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales. A continuación se listan algunas de ellas (ANCADE, s/f-b; ANFACAL, s/f; Usedo, 2016):

- Exhiben buena plasticidad y consistencia, lo que permite la adaptación de los morteros a las deformaciones del soporte sin generar fisuras.
- Su tiempo de fraguado es mayor.
- Presentan mejor rendimiento.
- Manifiestan un incremento en la retención de agua.
- Su resistencia aumenta debido a la carbonatación de la cal.

- Su volumen se mantiene bajo condiciones variables de humedad.
- Tienen permeabilidad apreciable al vapor de agua, por lo que se eliminan las condensaciones de agua en las paredes, y se reduce la aparición de humedades. En síntesis, y de forma coloquial, se entiende que los muros pueden “respirar”.
- No muestran eflorescencias ya que no contienen sales solubles.
- Presentan adecuado aislamiento térmico y acústico.
- Su resistencia al acceso de agua por lluvia es buena.
- Resisten el hielo con ausencia de capilaridad.

1.2.6 Cal en Colombia

En Colombia abundan las reservas de cales, por lo que resulta difícil cuantificarlas. Sin embargo, la roca caliza se encuentra en las tres cordilleras Andinas (Osorno Henao, 2012). De acuerdo con Suescun (1988, citado por Osorno Henao, 2012), los yacimientos de cal en Colombia se encuentran en los siguientes departamentos: Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Caldas, Cauca, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, Chocó, La Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Santander, Sucre, Tolima y Valle.

Con base en lo anterior, en la Tabla 1-1 se presenta la producción de roca caliza, durante el año 2016 y el primer trimestre del 2017. Se observa que los departamentos que presentaron mayor producción en el 2016 y durante el primer trimestre del 2017, fueron Bolívar, Boyacá y Tolima. Adicionalmente, en la Gráfica 1-2 se muestra la fabricación de caliza en Colombia, entre los años 1940 y 2016, donde se evidencia un crecimiento de la industria en la nación. A pesar de las cifras presentadas, los usos de la caliza no necesariamente se enfocan en la producción de cal; también se utiliza como materia prima para la producción de cemento.

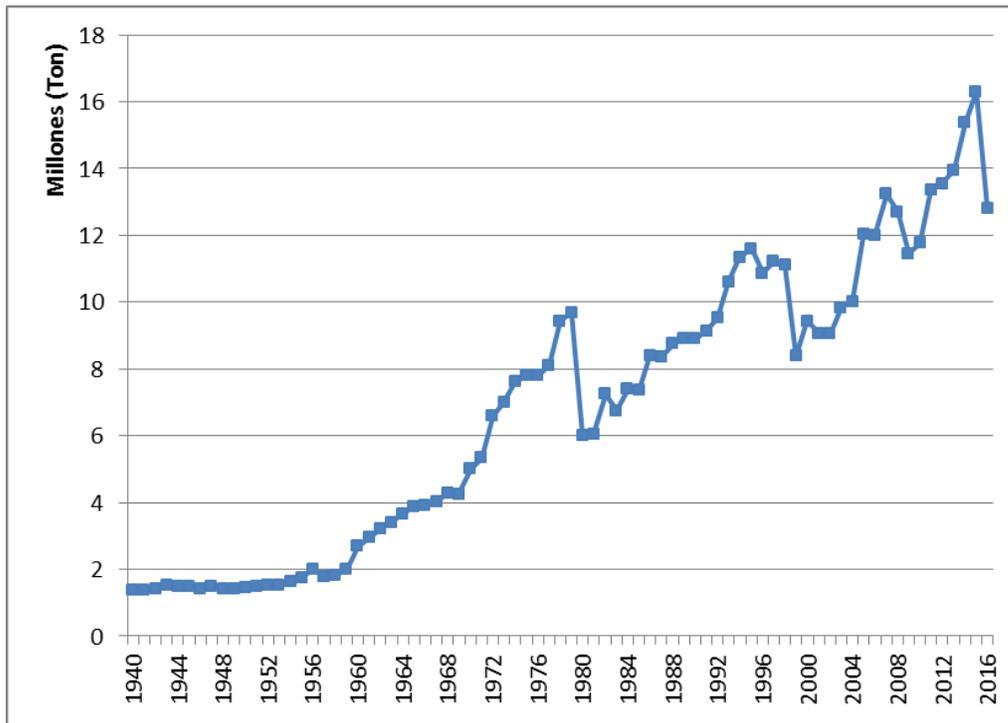
Por otra parte, las aplicaciones de la cal en Colombia, son las mismas que se presentaron previamente: industrias de hierro y acero, materiales de construcción, ingeniería civil, protección del medio ambiente, agricultura, industria química, entre otros.

Tabla 1-1 Producción de caliza en Colombia por departamento

DEPARTAMENTO	2016 (Toneladas)	2017 (Toneladas)
Antioquia	201 011.00	108 483.63
Atlántico	158 798.50	40 948.00
Bolívar	2 803 912.86	430 453.00
Boyacá	2 569 550.31	510 239.00
Caldas	10 903.00	4 128.00
Cesar	100 283.25	6 143.00
Córdoba	11 884.00	0.00
Cundinamarca	334 538.72	84 051.00
Huila	10 360.12	10 237.00
La guajira	46 145.44	28 389.00
Magdalena	364 680.48	33 988.00
Meta	42 975.55	0.00
Norte de Santander	248 146.35	98 796.00
Santander	273 134.70	80 130.00
Sucre	545 964.60	236 292.00
Tolima	3 545 573.16	773 721.00
Valle del Cauca	1 532 120.01	538 386.00

Fuente: Agencia Nacional de Minería (ANM) (2016, 2017)

30 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



Gráfica 1-2 Producción de cal en Colombia entre los años 1940 y 2016

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), Cálculo UPME (2016)

1.3 Adiciones

Las adiciones son sustancias que se incorporan en los morteros antes o durante su amasado, produciendo una modificación favorable en alguna de sus propiedades o en su comportamiento (Cazalla, 2002), y su uso, se ha asociado con la cal desde tiempos remotos (Sepulcre, 2005). A continuación, se presentan las tipologías de adiciones.

1.3.1 Adiciones orgánicas

Este tipo de adiciones se refiere a las sustancias que se encuentran de forma natural e inalterada, antes de mezclarse con otros materiales del mortero. De acuerdo a investigaciones, Albert Nenburger descubrió goma arábica de Tragacanto, colas de

animales de Rodas, sangre de hipopótamo, leche de higuera con yemas de huevo, entre otros productos que fueron utilizados en la antigüedad (Gárate, 1994).

1.3.2 Adiciones inertes

Estas adiciones se caracterizan por no poseer actividad hidráulica ni puzolánica (Salamanca, 2000). Sin embargo, contribuyen en propiedades especiales como plasticidad, color, adherencia, entre otras, sin presentar alteraciones en el fraguado (Cazalla, 2002).

1.3.3 Adiciones hidráulicas

Son adiciones que tienen un potencial hidráulico natural, es decir, proporcionan a los materiales la capacidad de endurecer con agua (Cazalla, 2002; Salamanca, 2000), por lo que necesitan de un activador como cal, clinker de cemento portland, yeso o un producto químico (Salamanca, 2000).

1.3.4 Adiciones puzolánicas

Son materiales que presentan carencia de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí mismas (Sepulcre, 2005). A pesar de su falta de hidraulicidad, estas adiciones tienen la capacidad de fijar hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a temperatura ambiente y con presencia de agua. En consecuencia, se originan productos sólidos no solubles, principalmente sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), que intervienen en el proceso de fraguado y endurecimiento de las mezclas. Entre las adiciones puzolánicas se encuentran: puzolanas naturales (rocas tobáceas, volcánicas vítreas y de naturaleza traquítica o pumítica) y puzolanas artificiales (cenizas volantes, arcillas calcinadas y algunas escorias siderúrgicas) (Cazalla, 2002).

1.3.5 Adiciones sintéticas

Este tipo de adiciones corresponden a las elaboradas por el hombre, o también materiales naturales que han sufrido alguna modificación. Algunos ejemplos son las

resinas, polímeros acrílicos, siliconas, algunos derivados del petróleo, entre otros (Ashurt, 1983; Sickel, 1981, citados por Cazalla, 2002).

1.4 Metacaolín

El metacaolín ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) o AS_2 , es un material puzolánico, y debido a su alta reactividad, es uno de los más utilizados (A Arizzi, Cultrone, & Sebastián, 2009). La materia prima de este material son las arcillas de la familia caolín, que en términos mineralógicos se denominan caolinita. Para su producción se calcina la caolinita a temperaturas que oscilan entre 500 °C y 800 °C. En consecuencia, se produce un cambio en las rocas, denominado deshidroxilación (Siddique, 2008).

Adicionalmente, el comportamiento de las arcillas durante la calcinación, depende de tres factores: su estructura, el tamaño de los cristales y el grado de cristalinidad. (Siddique, 2008). Durante el inicio de la calcinación, apenas a 100 °C los minerales de arcilla pierden la mayoría de agua absorbida. Ya entre los 500 °C y 800 °C, la caolinita comienza a perder agua por deshidroxilación. Durante el proceso debe tenerse cuidado con la exposición térmica, puesto que, si llega a excederse el punto definido de calcinación, se presentará sinterización del material y formación de mullita, la cual queda quemada y no es reactiva. La clave en la producción de metacaolín para ser utilizado como puzolana, se encuentra en alcanzar la deshidroxilación sin sobrecalentamiento.

Esta puzolana tiene varios usos, entre los que se encuentran: concretos de alta resistencia, concretos ligeros, prefabricados de concreto, productos con ferrocemento, concreto reforzado con fibras de vidrio, morteros, revocos, materiales de reparación y mejoras en acabados, color y apariencia (Siddique, 2008).

De otro lado, su uso en mezclas de mortero o concreto presenta una serie de ventajas: aumento en las resistencia a compresión y flexión, reducción de permeabilidad, mejora en la resistencia de ataques químicos, incremento en la durabilidad, disminución de retracción, facilita la manejabilidad, evita la posible aparición de eflorescencias, incrementa la resistencia al agua, adiciona plasticidad a las mezclas y aumenta su densidad (Cazalla, 2002; Siddique, 2008).

1.4.1 Reacciones que se producen entre la cal y el metacaolín

Como el metacaolín es un producto a base de sílice y alúmina, al mezclarlo con la cal y agua, se obtiene una reacción entre los componentes de la puzolana y el Ca(OH)_2 , por lo que se producen silicatos cálcicos hidratados (CSH), y productos cristalinos los cuales incluyen aluminato cálcico hidratado (CAH) y alumino-silicatos hidratados (Siddique, 2008). Entre estos últimos se encuentran: stratlingita (C_2ASH_8), C_4AH_{13} , que corresponde a una fase metaestable, presente solamente en la etapa inicial de la reacción de hidratación, y que luego se descompone en hidrogranate (C_3AH_6) e hidróxido de calcio (A Arizzi et al., 2009).

1.5 Polvo de ladrillo

Desde la antigüedad se han utilizado partículas cerámicas en morteros, en forma de polvo o en granos. Los primeros indicios de morteros de cal hidratada adicionados con arcilla se remontan al año 3000 a.C., en Babilonia. Posteriormente, en el Imperio Romano se utilizaba con frecuencia el polvo de ladrillo como puzolana, ya que los materiales de tipo natural eran escasos; los primeros documentos que evidencian su uso son los de Catón y Vitrubio. Del mismo modo, en otras zonas geográficas como India, Arabia y Turquía se han encontrado vestigios de la utilización de materiales cerámicos. Actualmente, es fácil encontrar tales morteros en edificaciones históricas, lo que demuestra su durabilidad (Matias et al., 2014).

La materia prima utilizada para la producción de ladrillos consiste en arcillas naturales, que contienen cuarzo, feldespato y otros minerales (Böke, Akkurt, & Elif, 2006). Con el tiempo, se ha demostrado que la adición de pequeñas partículas cerámicas en morteros de cal, confiere a la mezcla mejores propiedades. Del mismo modo, las reacciones puzolánicas que se presentan, les proporcionan a los morteros propiedades hidráulicas.

Por otro lado, se ha estimado que un 30% de la producción de productos cerámicos resulta como desperdicio, lo cual dificulta su reciclaje, puesto que son durables, presentando alta resistencia a degradación biológica, química y física (Binici, 2007), por lo que agregar dichos desperdicios en mezclas de cal puede tener ventajas técnicas y ambientales (Matias et al., 2014).

1.5.1 Reacciones que se producen entre la cal y el polvo de ladrillo

En primer lugar, la reactividad de las puzolanas puede verse afectada por diferentes factores: la cantidad de sílice y alúmina, la temperatura de cocción de los materiales cerámicos, la cantidad y el tipo de arcillas que conforman los materiales, la granulometría de la adición y el área específica. Cuando se mezcla el Ca(OH)_2 presente en la cal, con agua y la sílice y la alúmina presentes en los materiales cerámicos, se genera una reacción, obteniendo como resultado la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio. Del mismo modo, algunos estudios indican que la reacción puzolánica que se presenta, depende del sílice y la alúmina que reaccionan con el dióxido de calcio (Matias et al., 2014). Lo anterior resulta análogo con la reacción que se presenta entre el metacaolín y la cal cuando se hidratan con agua.

1.6 Uso y evolución de la mampostería en la historia

La historia de la mampostería puede considerarse como el inicio de la historia de la propia ingeniería civil. De igual forma, materiales como las rocas, se encuentran en la naturaleza, por lo que la mampostería es el material de construcción más antiguo conocido por el hombre (Taly, 2010). Asimismo, se han utilizado diferentes materiales para construcciones en mampostería, resultando más convenientes los que se encuentran localmente (Drysdale, Hamid, & Baker, 1994). A continuación, se realizará una síntesis de la evolución y desarrollo de la mampostería en la historia.

1.6.1 Mampostería en la prehistoria

Hace unos 20000 años, el hombre de Cro-Magnon construyó un refugio apilando rocas (Drysdale et al., 1994). Lo más probable es que dicha construcción le servía de refugio contra las inclemencias del clima y las bestias salvajes. No obstante, tal invento debió repetirse cantidades de veces, debido a la escasa o nula transmisión de técnicas (Gallegos & Casabone, 2006).

Más adelante, comenzaron a utilizarse los primeros morteros de barro, el cual permitía asentar con mayor facilidad las rocas irregulares que se empleaban. En consecuencia, los primeros refugios brindaban mayor protección a sus ocupantes, y de cierta manera eran más resistentes y estables. Vestigios de construcciones de este tipo se encuentran en las Islas Aran (Irlanda), Catal Hüyük (Anatolia), entre otras (Gallegos & Casabone, 2006).

Por otra parte, las primeras unidades de mampostería se fabricaron presionando barro o arcilla en forma de bulto, y en algunas ocasiones con formas alargadas; estos ladrillos se dejaban secar al aire o bajo el sol (Drysdale et al., 1994). El desarrollo de estos elementos debió darse en sitios donde no se conseguían rocas. La evidencia más antigua de estas unidades se encontró en Jericó (Palestina), consistente en una pieza de barro alargada, moldeada a mano y secada al sol (ver Figura 1-4). En otras zonas geográficas también se han encontrado unidades de forma cónica, como es el caso de Mesopotamia y Perú (Gallegos & Casabone, 2006).

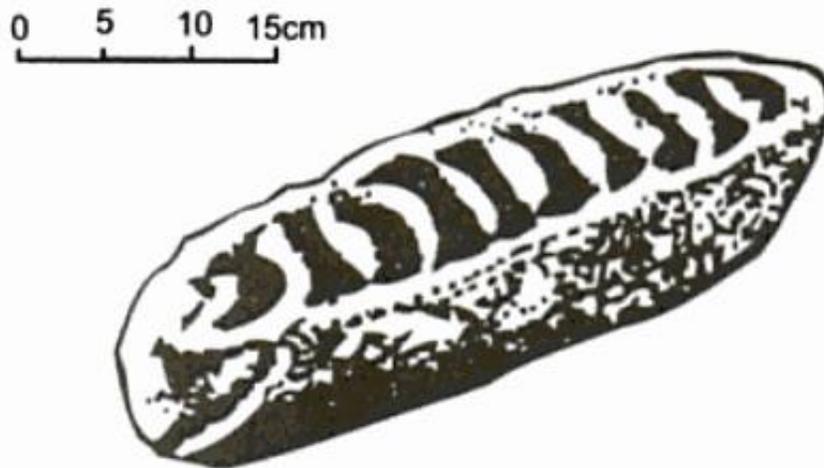


Figura 1-4 Unidad de mampostería en barro, secada al sol

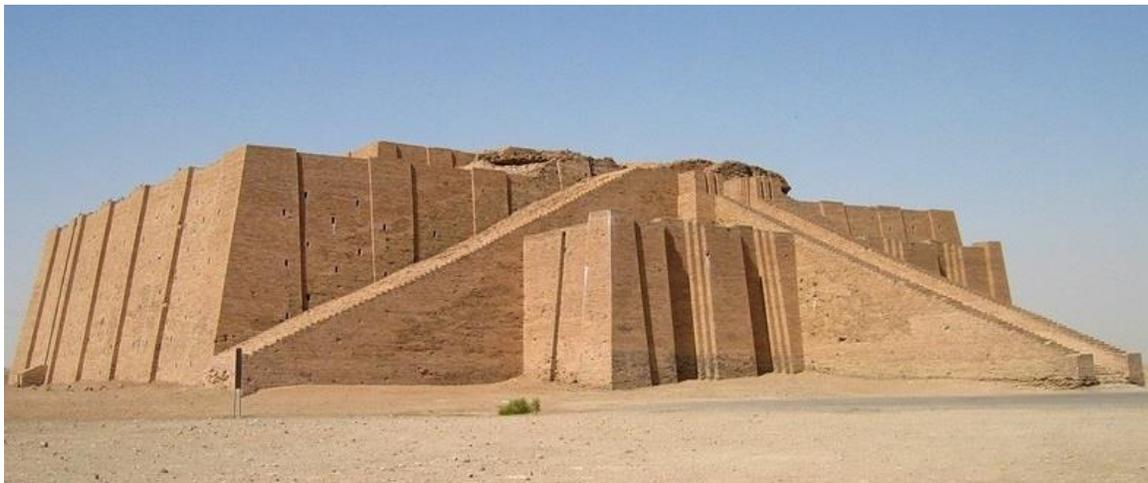
Fuente: Tomado de (Gallegos & Casabone, 2006, p. 50)

1.6.2 Mampostería en Sumeria

Cuando se desarrollaron civilizaciones en las llanuras fluviales, estas utilizaron los depósitos aluviales para crear la arquitectura de ladrillo. Los sumerios se asentaron en las tierras que se encontraban entre los ríos Eufrates y Tigris. Por ende, hicieron uso de

ladrillos de tierra secados al sol, también conocidos como adobe (Drysdale et al., 1994); para su fabricación utilizaron moldes rústicos de madera, que incluso aún se utilizan en Iraq (antigua Mesopotamia) (Gallegos & Casabone, 2006). En el proceso de fabricación, añadían estiércol del ganado o paja, con la intención de aumentar la resistencia de los elementos (Drysdale et al., 1994). El uso de moldes permitió acelerar la producción de unidades, manteniendo uniformidad en su geometría (Gallegos & Casabone, 2006).

A principios del tercer milenio a. C., los sumerios llevaron el adobe al horno (Gallegos & Casabone, 2006), descubriendo un gran aumento en la resistencia y la durabilidad del material (Drysdale et al., 1994). Para la construcción de edificaciones, asentaban el ladrillo con morteros de betún o alquitrán, al cual le agregaban arena. En ciertos lugares de construcciones elevadas, donde se presentaban grandes esfuerzos, reforzaban el mortero con fibras de caña (Gallegos & Casabone, 2006), confiriéndole mayor resistencia y control de la retracción. Un ejemplo de edificaciones sumerias son los zigurat (ver Fotografía 1-11), construidos principalmente en mampostería, alcanzando alturas hasta de 53 metros (Drysdale et al., 1994).



Fotografía 1-11 Zigurat

Fuente: Tomado de <http://static4.sobrehistoria.com/wp-content/uploads/2012/05/zigurat-jmcfallflickr2.jpg>

1.6.3 Mampostería en Egipto

Los egipcios optaron por utilizar las rocas disponibles en las montañas a lo largo del río Nilo; entre estas se encontraban caliza, arenisca, granito, basalto y alabastro. Para la explotación, disponían de canteras, donde desprendían bloques de material y les introducían cuñas metálicas. Posteriormente, formaban grandes monolitos, utilizando esferas y martillos de diorita; en otras ocasiones tallaban directamente columnas, vigas y losas (Gallegos & Casabone, 2006). A pesar de utilizar la roca como material principal, existen evidencias del uso de ladrillos de barro hacia el año 3000 a.C., en lo que fueron las primeras pirámides, conocidas como mastabas (ver Fotografía 1-12), las cuales tenían alturas de 9 metros. Ya hacia el año 2580 a.C., fue el apogeo de la construcción de pirámides, construidas con roca tallada (Drysdale et al., 1994), sentada en morteros de yeso, y revocadas con mezclas de cal y yeso (Gallegos & Casabone, 2006).



Fotografía 1-12 Mastaba egipcia

Fuente: Tomado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Mastaba-faraoun-3.jpg>

1.6.4 Mampostería en Roma

En general los romanos hicieron uso de roca caliza, travertino y tufa volcánica, la cual abundaba en las colinas romanas. Sin embargo, también hicieron uso de mampostería de arcilla cocida, ya utilizada por los sumerios siglos antes. En otros casos, utilizaron

rocas importadas desde las canteras egipcias, y mármoles griegos (Gallegos & Casabone, 2006).

Uno de los mayores aportes de la cultura romana, fue la invención de los primeros morteros de cementos y concretos, para lo cual utilizaban cal, arena y agregados gruesos. Con dicha innovación, desarrollaron diferentes sistemas de construcción de muros, los cuales resultaban más económicos y fáciles de edificar. A modo de ejemplo, en las construcciones públicas generalmente construían muros de mampostería de roca o ladrillos cerámicos, asentados en morteros de cal (Gallegos & Casabone, 2006). Del mismo modo, en elementos estructurales más gruesos, construían dos muros delgados de mampostería, bien terminados en sus caras externas, dejando un espacio entre estos, el cual rellenaban con roca y fragmentos de ladrillo, acomodados con mortero de cal y arena (Drysdale et al., 1994; Gallegos & Casabone, 2006). En la Figura 1-5 se presenta la técnica utilizada por los romanos.

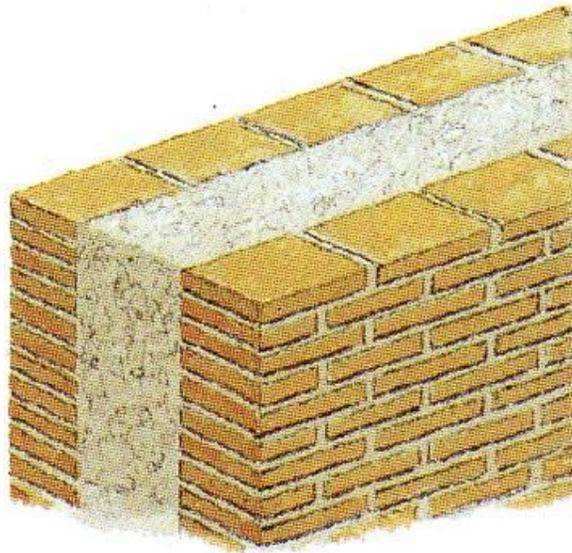


Figura 1-5 Muro romano grueso

Fuente: Tomado de:

<https://i.pinimg.com/originals/7c/c8/ba/7cc8ba548d66df3881e01394dcce6823.jpg>

1.6.5 Mampostería en la Edad Media y el Renacimiento

Después de la caída del Imperio romano, por varios siglos no se dieron avances en la tecnología de la mampostería. De igual forma, la tecnología del mortero de cemento y el concreto se perdió completamente, para ser rescatada siglos más tarde. A pesar de la falta de avances, la mampostería fue importante en Europa occidental, pues permitía controlar los incendios que destruían las ciudades medievales (Gallegos & Casabone, 2006).

Hacia el siglo XII, apareció el arco apuntado gótico y la bóveda de crucería, los cuales permitían cubrir grandes luces y transformar así la construcción tradicional de las obras de mampostería. De esta forma, se sustituyeron los muros gruesos laterales, por elementos esbeltos. Estos últimos transmitían la carga lateral a través de soportes a contrafuertes contrapesados. Fue así que el manejo de mampostería de unidades pequeñas, de arcilla o piedra, sentadas en morteros de cal, permitió mantener estabilidad a compresión en las secciones y elementos (Gallegos & Casabone, 2006).

En 1620, el rey de Inglaterra, Jacobo I, proclamó una ordenanza en la que se fijaba el espesor mínimo de muros en sótanos y primeros niveles. Hacia 1625, el monarca promulgó un nuevo estatuto, donde se especificaban las dimensiones del ladrillo estándar. Lo anterior es un reflejo de antecedentes de nuestros reglamentos de construcción actuales (Gallegos & Casabone, 2006). Así mismo, como dato anecdótico, en 1619 se patentó la primera máquina para fabricar unidades de arcilla (Drysdale et al., 1994).

1.6.6 Mampostería moderna

En el siglo XVIII inició la revolución industrial en Inglaterra, donde se extendió la aplicación de la mampostería de ladrillos de arcilla cocida. Del mismo modo, las plantas de producción se ubicaron en zonas aledañas a las minas de carbón, material que constituía un combustible abundante en la naturaleza y económico. (Gallegos & Casabone, 2006).

En 1925 se inventó el horno de producción continua en Dinamarca (Gallegos & Casabone, 2006), y en 1858 se dio la introducción del horno Hoffman (Drysdale et al.,

1994), lo cual permitió acelerar los procesos de producción y mejorar la calidad de los ladrillos. De igual forma, el desarrollo de los hornos se vio acompañado de mejoras en maquinarias auxiliares como molinos, trituradoras, mezcladoras, extrusoras y prensas (Gallegos & Casabone, 2006).

El cambio más relevante durante la revolución industrial, fue la introducción de métodos científicos en la producción de ladrillos, los cuales sustituyeron la metodología empírica utilizada por generaciones pasadas. Asimismo, se hizo por primera vez un análisis racional de las materias primas, la medición precisa de las temperaturas de los hornos, y una formulación de los requerimientos para impedir el agrietamiento de las unidades (Gallegos & Casabone, 2006). Estas innovaciones agilizaron los procesos de fabricación, considerando que en el pasado, para la elaboración de unidades de arcilla cocida, se extraía la materia prima en otoño y se dejaba a la intemperie durante el invierno, para luego ser moldeada en bloques en primavera; posteriormente, para su cocción resultaba preferible que estos tuvieran dos años de secado a la sombra (Drysdale et al., 1994).

Al mismo tiempo que se desarrollaba la producción de ladrillos, también se evidenciaba el origen de la mampostería reforzada que conocemos actualmente. Un ejemplo es el uso de barras de hierro forjado, embebidas en mampostería de roca, en la iglesia de Sainte-Geneviève en París, hacia el año 1770 (Drysdale et al., 1994). Sin embargo, se dice que los principios de la mampostería reforzada, fueron descubiertos por el ingeniero Marc Usambard Brunel (Taly, 2010). En 1813, propuso reforzar una chimenea, utilizando barras de hierro forjado. Años más tarde, en 1825, utilizó dicho material en la construcción del túnel en el río Támesis (Gallegos & Casabone, 2006; Taly, 2010). A pesar de las propuestas de utilizar refuerzo en la mampostería, no se logró llegar a métodos racionales de diseño (Gallegos & Casabone, 2006).

Teniendo en cuenta los primeros indicios del uso de reforzamiento en la mampostería, el desarrollo de la mampostería reforzada moderna se atribuye al ingeniero Alexander Brebner, quien condujo diferentes ensayos en mampostería reforzada (Taly, 2010) en India. En total se ensayaron 682 especímenes, que incluían vigas, losas, columnas y arcos, por lo que el trabajo de Brebner constituye la primera investigación organizada en

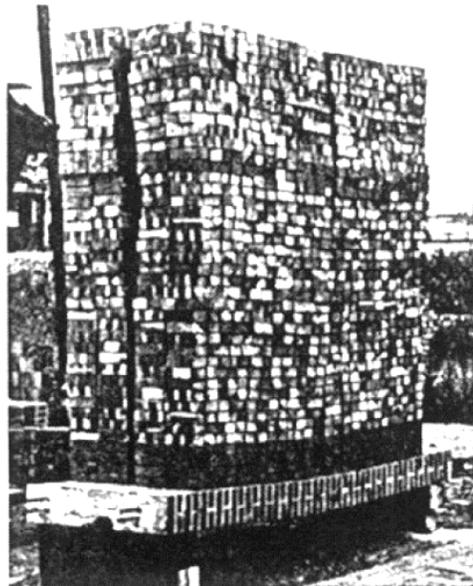
mampostería reforzada, y se ha considerado como el punto de partida del desarrollo moderno de la mampostería reforzada. Adicionalmente, el informe final de la investigación planteó procedimientos racionales de diseño. (Gallegos & Casabone, 2006).

Con base a los trabajos realizados en India, en las primeras décadas del siglo XX, en Japón se construyeron un total de 300 000 m² de muros en mampostería reforzada en edificios públicos y privados, obras de contención, puentes, silos y chimeneas. En el informe del ingeniero Skigeyuki Kanamori, se señalaba lo siguiente (Gallegos & Casabone, 2006):

“No existe duda de que la albañilería reforzada debe ser empleada en lugar de la albañilería simple cuando hay esfuerzos de tracción en la estructura. De esta manera las podemos hacer más fuertes y más seguras y también más económicos. Más aún: he encontrado que la albañilería reforzada es más conveniente que el concreto armado, y, lo que es más importante, conduce a un apreciable ahorro de tiempo.”

En Estados Unidos, las investigaciones en construcciones de mampostería fueron tomadas del trabajo desarrollado por la Asociación de Fabricantes de Ladrillos de América. Posteriormente fueron continuadas por el Instituto de Productos Estructurales de Arcilla y la Fundación para Investigación de Productos de Arcilla Estructurales. Desde 1924 se desarrollaron ensayos de laboratorio en elementos de mampostería reforzados, tales como: vigas, losas, columnas y estructuras a escala real. Tales estudios generaron información valiosa de diferentes aspectos de la mampostería reforzada (Taly, 2010), sentando las bases para las investigaciones realizadas en las últimas décadas, en diferentes países del mundo (Gallegos & Casabone, 2006). En la Fotografía 1-13 se presenta un ensayo de flexión perpendicular al plano en un muro de mampostería reforzada.

Por otra parte, en lo referente a las unidades de concreto, su desarrollo en la industria de la construcción se dio en 1930. El uso de refuerzo de acero en este tipo de mampostería tuvo inicio entre 1930 y 1940. En los años posteriores, la mampostería reforzada de concreto se consideró como una práctica viable en la construcción de edificaciones de uno o varios niveles (Taly, 2010).



Fotografía 1-13 Flexión perpendicular al plano en muro de mampostería reforzada

Fuente: Tomado de (Taly, 2010)

1.6.7 Mampostería en Colombia (Molina & Hinojosa, 2011)

En 1810 comenzó la época de la República en Colombia, período que duró hasta el siglo XX, y en el cual comenzaron a evidenciarse las influencias de la modernidad y la industrialización. En lo referente a la arquitectura, durante el período republicano se construyó una cantidad considerable de edificaciones, caracterizadas por la diversidad de estilos, tomados de tendencias que se consideraban pasadas de moda en Europa.

Por otro lado, durante los años 1810 y 1920, se presentó una transición entre la época colonial y la moderna. En este período, se presentó un aumento en la producción de productos cerámicos, lo que dio lugar al origen de las primeras fábricas de ladrillos en la ciudad de Bogotá. Del mismo modo, materiales como el ladrillo y la teja de barro, sufrieron cambios significativos en dicho momento, debido al crecimiento urbano, producto de los desplazados de la Guerra de los Mil Días.

Durante el período de transición, se dieron innovaciones en los sistemas de producción de ladrillos. Un ejemplo, son las mejoras de las técnicas de fabricación en el año 1831,

cuando comenzaron a elaborar unidades prensadas con máquina y bien cocidas. Hacia 1856, José María Calvo fundó una de las primeras ladrilleras de Bogotá, ubicada en el barrio Las Cruces; allí se producía el denominado “ladrillo Calvo”, el cual era utilizado en la construcción de viviendas en el centro de la ciudad. Posteriormente, hacia el año 1906, se construyeron los primeros hornos para materiales cerámicos de buena calidad, aptos para la construcción. Adicionalmente, las técnicas constructivas también evolucionaron, gracias a los conocimientos que llegaron con nuevos arquitectos, procedentes de Italia, Inglaterra, Bélgica, Francia, Estados Unidos, entre otros.

Por último, algunas de las edificaciones representativas del período de transición en Bogotá son: el Palacio de San Francisco, la Iglesia de Lourdes, la Iglesia de Santa Teresita, la Iglesia de las Nieves, la Iglesia de las Cruces, la Capilla de Las Cruces, el Teatro Colón, el Hospital de San José, La Iglesia de Egipto, la Iglesia del Voto Nacional, la Estación de la Sabana y algunas de las construcciones del Hospital San Juan de Dios. Otro inmueble de interés es el Palacio Liévano, construido entre 1902 y 1910; su sistema estructural son muros de carga en mampostería, y para las fachadas se utilizaron ladrillos rosados.

1.7 Patrimonio

De acuerdo a la Ley 1185 de 2008, en el Artículo 1, “el patrimonio cultural de la Nación se encuentra constituido por todos los bienes materiales, las manifestaciones inmateriales, los productos y las representaciones de la cultura que son expresión de la nacionalidad colombiana”. Entre dichos bienes, se encuentran los bienes de naturaleza mueble e inmueble, a los que se les atribuye especial interés histórico, artístico, científico, estético o simbólico en ámbitos como el plástico, arquitectónico, urbano, arqueológico, entre otros. Asimismo, en dicha legislación, se encuentran los objetivos de la política estatal, relacionada con el patrimonio cultural de la Nación, donde se expresa la importancia de salvaguardar, proteger recuperar, conservar, sostener y divulgar el patrimonio cultural (Ministerio de Cultura, 2010).

1.8 Conservación, restauración y reforzamiento de edificaciones patrimoniales

En la actualidad, una cantidad de edificaciones patrimoniales del pasado, sobreviven en nuestra era, por lo que resulta necesario su preservación y uso cuidadoso (Meli, 1998). Del mismo modo, el patrimonio arquitectónico, además de poseer un inmenso valor cultural, también tiene intereses económicos, puesto que en ocasiones, los edificios o monumentos históricos, son el principal atractivo de una ciudad, generando así beneficios monetarios directos e indirectos (Peña, Rivera, & Arce, 2010). Es por esto, que las sociedades modernas tienen un punto de referencia cultural y de diversidad en las edificaciones patrimoniales, las cuales deberían perdurar. Para esto, las generaciones actuales tienen la misión de mantener el patrimonio en buen estado (Lourenço, 2013), permitiendo que las futuras generaciones puedan seguir enriqueciéndose con el legado de sus antecesores, ya que es parte de su herencia cultural, y constituyen evidencias de las grandes realizaciones de la humanidad (Meli, 1998).

1.8.1 Factores que afectan las edificaciones patrimoniales

Por otra parte, la vida útil de las edificaciones históricas se ve amenazada por diferentes factores externos. Entre estos, se encuentran agentes naturales: intemperie, sismos, asentamientos del terreno, viento, lluvia, entre otros. Otra causa del detrimento en las estructuras es generado por actividades humanas: vibraciones generadas por el tráfico, contaminación, excavaciones, construcciones aledañas, entre otras (Meli, 1998). En conjunto con lo anterior, en ocasiones las construcciones antiguas no han sido sometidas a procesos de mantenimiento, por lo que se presentan problemas estructurales que amenazan la integridad del edificio y de los ocupantes (Lourenço, 2013).

1.8.2 Conservación y restauración

Para definir el concepto “conservación”, el Artículo 4 de la Carta Internacional sobre la conservación y restauración de monumentos y sitios, más conocida como “Carta de

Venecia” (ICOMOS, 1964), indica que “la conservación de monumentos implica primeramente la constancia en su mantenimiento”. En términos de Roberto Meli (1998), se entiende como las tareas que permiten prolongar la vida de una edificación.

En lo referente al término “restauración”, la “Carta de Venecia” (ICOMOS, 1964) indica que “es una operación que debe tener un carácter excepcional”. Del mismo modo, dicho documento menciona que la finalidad de la restauración es “conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos”. Del mismo modo, dicha actividad “siempre estará precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento”. De acuerdo a Meli (1998), cuando los agentes naturales o humanos afectan de manera significativa la integridad de una edificación, las actividades requeridas para la conservación dejan de ser una medida de mantenimiento, dando lugar a un tratamiento más profundo, que corresponde a la restauración.

1.8.3 Problemática en la intervención del patrimonio arquitectónico

Debido a cuestiones como los materiales y los métodos constructivos utilizados en edificaciones patrimoniales, surgen una serie de retos para su conservación, diagnóstico, monitoreo y reforzamiento. Esto se debe a las restricciones que surgen al intentar aplicar los códigos de construcción vigentes, por lo que se hacen necesarias recomendaciones, que aseguren métodos racionales de análisis y métodos de reparación, que resulten apropiados al contexto cultural (Lourenço, 2013).

Por otro lado, la pérdida de conocimientos de los materiales y las técnicas tradicionales de construcción, representan otra problemática en el campo de la conservación y restauración de edificaciones patrimoniales (Peña et al., 2010). En consecuencia, hasta mediados del siglo pasado, se tenía una fe ciega en la tecnología y materiales modernos (concreto y acero), despreciando las características de los materiales originales y los métodos constructivos de antaño (Peña & Lourenço, 2012).

Otro problema presente en las edificaciones patrimoniales es la certeza del deterioro de las estructuras. Por lo general, los edificios comienzan a presentar daños en forma de agrietamientos, aplastamientos, desprendimientos y deformaciones, causas que son

apreciables a simple vista. Sin embargo, en ciertos casos, no se presenta evidencia externa de la pérdida progresiva de resistencia, presentándose casos de colapsos súbitos (Meli, 1998).

En respuesta a las problemáticas presentadas, y a muchas otras que surgen en el ejercicio profesional, el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS, por sus siglas en inglés), aprobó y ratificó los principios para el Análisis, Conservación y Restauración de las Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (ISCARSAH, por sus siglas en inglés). El objetivo principal del documento era garantizar la aplicación de métodos racionales de análisis y restauración, que se adaptaran al contexto cultural (Peña et al., 2010).

1.8.4 Fundamentos para la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico

Como se ha observado, la conservación y restauración de edificaciones patrimoniales no es una labor sencilla., por lo que el criterio a utilizar, debe centrarse en tres aspectos esenciales: la seguridad de las personas, la protección de los valores intrínsecos de la edificación (arte, arquitectura, historia, economía, ingeniería (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010)) y el uso (pasado, presente y futuro) de la misma (Peña & Lourenço, 2012). Del mismo modo, cabe resaltar que la ingeniería estructural de construcciones históricas, no se limita al cálculo y análisis de esfuerzos, para su correspondiente revisión de seguridad y planteamiento de reforzamientos. Las actividades de preservación, van mucho más allá, pues se requieren procedimientos de inspección de las propiedades de los materiales, un diagnóstico del estado del edificio, un monitoreo de su comportamiento, y evaluaciones técnicas para corregir los daños presentes (Lourenço, 2013; Meli, 1998; Peña et al., 2010).

Con base en lo anterior, debe tenerse en cuenta que los estudios necesarios para la preservación del patrimonio arquitectónico, son multidisciplinarios, y requieren la cooperación de varios profesionales como historiadores, arquitectos, ingenieros, restauradores de arte, entre otros. Así mismo, las intervenciones se fundamentan en el conocimiento y entendimiento del comportamiento de las edificaciones, al igual que de

las causas reales de los daños potenciales y las alteraciones (ICOMOS, 2003; Peña et al., 2010, citados por Peña & Lourenço, 2012; ICOMOS, 1947, 2003; Peña et al., 2009, citados por Peña et al., 2010).

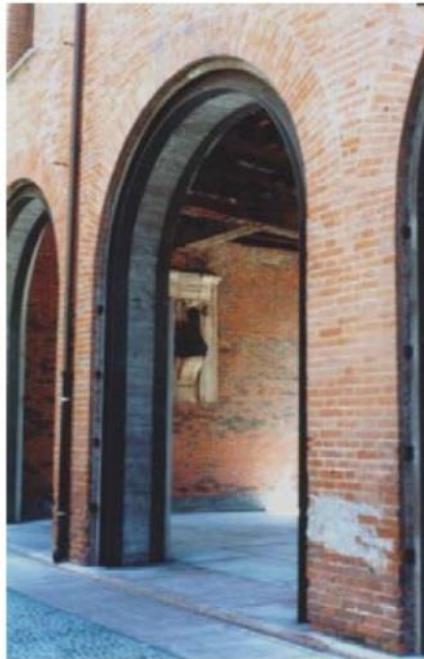
Por otra parte, no puede olvidarse que las intervenciones en las edificaciones patrimoniales, siempre tendrán una acción directa sobre la estructura original, sus materiales o elementos. En consecuencia, se pueden presentar daños en la integridad y naturalidad de los materiales originales, al igual que las propiedades estructurales de los inmuebles. Por esta razón, es necesario realizar estudios complementarios, adecuados a las tipologías estructurales y a las características de los materiales utilizados en la antigüedad, para garantizar la estabilidad de la estructura y mantener su valor patrimonial.

1.8.5 Reforzamiento en edificaciones patrimoniales

En el momento de ejecutar una reparación o un reforzamiento, la decisión relacionada con la conveniencia de una intervención y la técnica a utilizar, no debe basarse únicamente en consideraciones de carácter estructural (Meli, 1998). Por esta razón, la selección de una alternativa de refuerzo, debe basarse en los principios de conservación y los criterios modernos para intervención de edificaciones históricas (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010): respeto a la originalidad estructural, mínima alteración o impacto, seguridad estructural, compatibilidad, alternativas no invasivas, reversibilidad y remoción de las soluciones, y monitoreo. A continuación, se explicarán los principios más representativos.

1.8.5.1 Respeto a la originalidad estructural y mínima alteración

Al momento de intervenir una edificación patrimonial, debe tenerse en cuenta que su concepción estructural forma parte de su valor cultural, lo que hace necesario preservar el sistema concebido por los diseñadores y constructores originales, al igual que los materiales utilizados. Del mismo modo, las actividades de reforzamiento, deben alterar lo mínimo posible el sistema original, asegurando un nivel de seguridad apropiado (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010). En la Fotografía 1-14 se presenta el ejemplo de una intervención que respeta el diseño estructural original, alterando lo mínimo posible el inmueble.



Fotografía 1-14 Respeto a originalidad estructural y mínima intervención

Fuente: Tomado de (Peña & Lourenço, 2012)

1.8.5.2 Seguridad estructural

Para el diagnóstico de la seguridad estructural, resulta de gran importancia comprender a fondo el funcionamiento estructural de la edificación original. Lo anterior, implica entender el mecanismo de transmisión de fuerzas, concebido por los diseñadores (Meli, 1998). De igual manera, deben considerarse las pérdidas artísticas o culturales que pueda sufrir el edificio, en caso de que se presenten daños estructurales (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010).

1.8.5.3 Compatibilidad

Al momento de intervenir el patrimonio arquitectónico, resulta importante la compatibilidad entre el comportamiento de la edificación intervenida y sin intervenir ante agentes externos. Del mismo modo, es trascendental la afinidad estructural, sobre todo la rigidez (Meli, 1998), ya que si se hace una intervención inadecuada, se pueden generar mayores daños (Nežerka et al., 2016).

Otro aspecto esencial, es la compatibilidad físico-química entre los materiales de intervención y los originales, con la finalidad de prevenir efectos indeseables en la edificación (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010). Por ejemplo, durante el siglo XX, se utilizaron morteros con cemento Portland para restauración (Vejmelková, Keppert, Keršner, Rovnaníková, & Černý, 2012). Sin embargo, en las últimas décadas se han observado daños severos en varias estructuras de mampostería antigua, tratadas con cemento (Nežerka et al., 2016). A raíz de esto, varios autores han indicado que el uso de éste material en el patrimonio cultural, tiene una serie de desventajas; entre ellas: cristalización de sales presentes en los morteros de cemento que afectan los ladrillos (Nežerka et al., 2014, 2016; Pozo-Antonio, 2015), adhesión pobre entre el mortero y las unidades de mampostería, conductividad térmica alta, baja porosidad (Vejmelková et al., 2012), baja plasticidad, fragilidad y ganancia de rigidez rápida (Nežerka et al., 2014, 2016). En la Fotografía 1-15, se presenta una intervención en la que se utilizó cemento en una estructura de adobe, demostrando la incompatibilidad existente entre los materiales.



Fotografía 1-15 Incompatibilidad de materiales en intervención patrimonial

Fuente: Tomado de (Peña & Lourenço, 2012)

1.8.5.4 Reversibilidad de las soluciones

Cuando sea posible, el reforzamiento debe ser reversible, por lo que al remover la solución, el material original o la edificación, regresarán a su estado original, sin sufrir ningún tipo de daño (Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010). Del mismo modo, este criterio deja la posibilidad de reponer o cambiar a futuro, el refuerzo por una alternativa más eficiente (Meli, 1998; Peña & Lourenço, 2012; Peña et al., 2010). En otros casos, puede que la solución resulte inadecuada o perjudicial para la estructura, lo que implica su retiro (Meli, 1998).

1.8.6 Técnicas de reforzamiento

Para clasificar las técnicas de refuerzo, existen diferentes criterios. Sin embargo, uno de los más comunes, es el de dividir las técnicas de reforzamiento en dos categorías: tradicionales y modernas. Las primeras se caracterizan por emplear materiales y metodologías semejantes a las del pasado (ver Tabla 1-2). En cambio, los métodos modernos utilizan materiales y dispositivos que son de uso frecuente en la construcción y reparación en la actualidad (ver Tabla 1-3).

Tabla 1-2 Técnicas tradicionales de reforzamiento

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Conexiones locales	Brinda continuidad en diferentes partes de la estructura, utilizando diferentes dispositivos, como grapas.
Confinamiento de columnas y muros	Incrementa la resistencia a compresión y la rigidez. La técnica aumenta la capacidad del elemento intervenido, pero tiene baja influencia en la capacidad global de la estructura. Para muros, por lo general se utilizan barras de acero inoxidable, colocadas transversalmente.

Tabla 1-2 (Continuación)

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Contrafuertes	Su función principal es impedir que se generen mecanismos de falla, relacionados con deformaciones laterales, aumentando así su resistencia.
Reconstrucción local	Se retira la mampostería afectada, reemplazándola con mampostería nueva con propiedades mecánicas similares a la original. En consecuencia, se mantiene la continuidad de la estructura.
Rejunteo	Se remueve el mortero dañado y degradado de las juntas, reemplazándolo por uno nuevo que sea compatible con el original.
Tensores	Se utilizan barras o cables de acero, los cuales se anclan a la estructura por medio de placas u otros elementos. Su función es brindar estabilidad o continuidad entre diferentes partes de la estructura.

Fuente: Elaboración propia con referencia a (Peña & Lourenço, 2012)

Tabla 1-3 Técnicas modernas de reforzamiento

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Anclajes	Se utilizan barras o cables de acero, que ayudan a mejorar la estabilidad de la estructura, impidiendo deformaciones excesivas.

Tabla 1-3 (Continuación)

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Costuras armadas	Se abren agujeros en los elementos a intervenir, donde se introducen barras de metal (acero inoxidable, titanio, entre otros), y luego inyectar mortero en estos.
Inyección	A través de las grietas del elemento estructural, o en agujeros previamente ejecutados, se inyecta mortero o resinas epóxicas. Esta solución aumenta las propiedades mecánicas del material intervenido. Sin embargo, debe garantizarse la compatibilidad del material de inyección con los materiales originales.
Reforzamiento externo	Se aplica refuerzo en las caras externas de los elementos, por medio de materiales de alto rendimiento (FRP, FRCM, SRG, mallas de acero, polímeros, entre otros), aumentando la resistencia de los elementos intervenidos. Para su colocación se utilizan polímeros, resinas epóxicas, morteros o pegamentos.

Fuente: Elaboración propia con referencia a (Peña & Lourenço, 2012)

1.8.7 Metodología para intervenir el patrimonio arquitectónico

Teniendo en cuenta los principios ISCARSAH de ICOMOS (2003), las actividades de intervención del patrimonio arquitectónico, pueden dividirse en cuatro aspectos primordiales (Peña & Lourenço, 2012): adquisición de datos, comportamiento estructural, diagnóstico y seguridad y medidas de intervención. En la Figura 1-6 se presenta un diagrama de flujo con la metodología propuesta por ICOMOS para las actividades mencionadas.

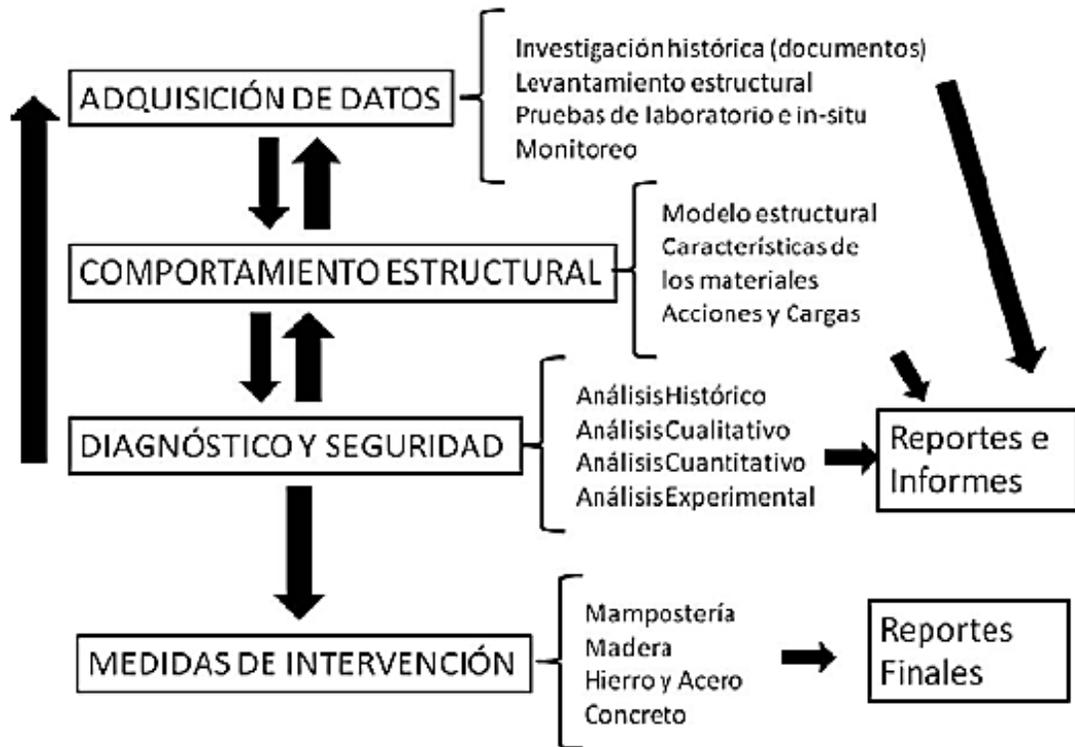


Figura 1-6 Propuesta planteada por ICOMOS para intervención del patrimonio arquitectónico

Fuente: Tomado de (Peña & Lourenço, 2012)

2. ESTADO DEL ARTE

En este numeral se recopila la información encontrada en la revisión bibliográfica, referente a las investigaciones realizadas sobre caracterización, propiedades mecánicas e interacción del mortero de cal y mampostería de arcilla cocida. En primer lugar, se presentarán las investigaciones internacionales, concernientes a los siguientes temas: morteros de cal y arena, mezclas adicionadas con metacaolín y polvo de ladrillo, carbonatación en mortero, mampostería sentada en morteros de cal y reforzamiento de mampostería con cuerdas de acero y FRCC. Posteriormente, se tratarán las investigaciones nacionales, entre las que se encuentra el estudio realizado por el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2.1 Estudios internacionales

2.1.1 Caracterización de morteros de cal y arena

Lanas y Alvarez (2003) investigaron algunos factores que afectan el comportamiento mecánico de los morteros de cal. Para esto, realizaron ensayos de flexión, compresión, análisis mineralógico, análisis térmico y de la estructura de poros. Para la investigación, los autores utilizaron dos tipos de calces aéreas, de tipo hidratado. También utilizaron cuatro clases de agregados; dos de estos compuestos principalmente por cuarzo, y los otros dos, calcíticos. Las proporciones en volumen cal : agregado fueron 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 y 1:5, que en peso serían 1:3.75, 1:7.5, 1:11.25, 1:15 y 1:18.75, respectivamente. Para las pruebas mecánicas, fabricaron prismas de 4 x 4 x 16 cm; para el curado de estas, utilizaron las siguientes condiciones: temperatura de 20 ± 5 °C y humedad relativa de $60 \pm 10\%$. Adicionalmente, las pruebas para determinar la resistencia a compresión, se ejecutaron a tres, siete, veintiocho, noventa y uno y trescientos sesenta y cinco días, observando un incremento significativo entre veintiocho y trescientos sesenta y cinco

días, independientemente del tipo de agregado utilizado y la dosificación. De igual manera, encontraron que la dosificación en peso 1:3.75, presentó la mayor resistencia a compresión, con valores entre 2.3 MPa y 5.4 MPa, por lo que afirmaron que el desarrollo de la resistencia se relaciona con la cantidad de cal. También concluyeron que los morteros con menores relaciones cal/agregado, presentaron un decremento en la resistencia a mayor tiempo de curado, lo que indicó que la máxima resistencia se relaciona con la presencia de cierta cantidad de portlandita sin carbonatar.

Moropoulou, Bakolas, Moundoulas, Aggelakopoulou y Anagnostopoulou (2005), evaluaron el desarrollo de la resistencia y las reacciones de morteros de cal. En efecto, realizaron ensayos de flexión, compresión y análisis térmico. Los materiales empleados en el estudio fueron masilla de cal, polvo de cal y arena silíceas como agregado. Para la fabricación de las probetas, los investigadores usaron las siguientes dosificaciones: masilla de cal : agregado de 1:1.5 y polvo de cal: agregado de 1:1.8. Posteriormente dejaron las muestras de ensayo a una temperatura de 20 ± 1 °C, y humedad relativa de $90 \pm 1\%$, durante los primeros dos días. Después de esto, los especímenes se dejaron en condiciones estándar de 20 ± 1 °C y humedad relativa de $50 \pm 1\%$, por quince meses. Adicionalmente, las resistencias a flexión y compresión, se determinaron a uno, tres, nueve y quince meses. De los resultados obtenidos, los autores observaron un aumento de la resistencia a compresión del 126% (0.7 MPa a 1.6 MPa) en las probetas elaboradas con masilla de cal, entre el primer mes de ensayo y el último. En cuanto a las muestras con polvo de cal, el incremento fue del 222% (0.9 MPa a 2.9 MPa) en el mismo intervalo de tiempo. De acuerdo a los resultados, los autores concluyen que los morteros presentaron tasas muy bajas de endurecimiento, hecho que se confirmó, con la evolución de las propiedades mecánicas y la transformación de portlandita. Por ende, afirman que los morteros aparentemente siguen endureciendo después de 15 meses de curado. Por último, el mejor comportamiento mecánico se registró en el mortero adicionado con polvo de cal.

Lanas, Pérez, Bello y Alvarez (2006), estudiaron las propiedades mecánicas de morteros de cal. Por consiguiente, realizaron pruebas de flexión, compresión, análisis mineralógico, análisis térmico, estructura de poros y microestructura. Los investigadores utilizaron cal dolomítica, la cual apagaron en agua, por un período de dieciséis días,

hasta que el óxido de magnesio (MgO) fuera menor al 10%. Para los agregados, utilizaron cuatro clases: dos de tipo silico-calcáreo, y los restantes, principalmente calcíticos. Las dosificaciones cal : agregado, empleadas en el estudio fueron 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 y 1:5, en volumen; al convertirlas en peso, las proporciones fueron 1:2.14, 1:4.29, 1:6.43, 1:8.57 y 1:10.71, correspondientemente. Del mismo modo, las probetas utilizadas en las pruebas mecánicas, consistieron en prismas de 4 x 4 x 16 cm, curados a una temperatura de 20 ± 5 °C y humedad relativa de $60 \pm 10\%$. De otro lado, los ensayos de compresión se llevaron a cabo en las siguientes edades: tres, siete, veintiocho, noventa y uno, ciento ochenta y dos y trescientos sesenta y cinco días. A partir de los resultados obtenidos, los autores evidenciaron un aumento considerable en la resistencia entre veintiocho y trescientos sesenta y cinco días, sin importar el tipo de agregado y las cantidades de cal y agregado. De igual forma, la mayor resistencia se presentó en las muestras fabricadas con la proporción 1:2.14, obteniendo valores alrededor de 4.0 MPa y 8.0 MPa, lo que indica que las probetas con mayor contenido de aglomerante, obtuvieron resistencias superiores. En cuanto a la edad en la que los morteros de cal dolomítica adquirieron su máxima resistencia, concluyeron que para dosificaciones de 1:1:4.29 a 1:10.71, se encuentra próxima a los noventa y un días. Sin embargo, para los morteros elaborados con agregados calcáreos, afirmaron que dicho tiempo es superior a los trescientos sesenta y cinco días. De igual manera, después de un año de curado en las condiciones mencionadas, se registró cierto contenido de portlandita sin carbonatar.

Hanley y Pavia (2008), investigaron la manejabilidad de morteros de cal y su influencia en la resistencia, por lo que realizaron ensayos de flujo inicial, resistencia a flexión y compresión. Para las mezclas, utilizaron agregado silíceo y tres tipos de cal hidráulica natural: de 2 MPa (NHL 2), 3.5 MPa (NHL 3.5), y 5 MPa (NHL 5) de resistencia a compresión. La relación cal : agregado utilizada fue 1:2.75. Para el estudio, se determinó la cantidad de agua requerida, para obtener flujos iniciales de 16.5 cm, 18.5 cm y 19.5 cm, para cada uno de los tipos de cal utilizados. De igual modo, se fabricaron cubos de 5 cm de arista para las pruebas de compresión. Dichos especímenes fueron curados en una cámara de curado con 20 ± 5 °C de temperatura, y humedad relativa superior al 60%, hasta las edades de ensayo, veintiocho y cincuenta y seis días. A partir de las cantidades de aguas necesarias para obtener los flujos iniciales mencionados, los autores afirmaron que a menor hidraulicidad de la cal, mayor resulta el agua requerida para alcanzar cierta fluidez. Con referencia a la resistencia a compresión, para las

mezclas con NHL 2, se obtuvieron los mayores valores en los casos que la fluidez era más baja. Para los morteros con NHL 3.5, la resistencia a compresión fue similar para los tres flujos iniciales planteados por los investigadores; sin embargo, los resultados más altos fueron para la fluidez de 18.5 cm. En cuanto a las mezclas con NHL 5, la resistencia resultó mayor para la fluidez de 18.5 cm, tanto a veintiocho como a cincuenta y seis días. De los resultados, los investigadores concluyen que no existe un valor universal de flujo inicial, para los morteros de cal hidráulica natural, que permite optimizar la resistencia. Por tal razón, cada tipo de cal tiene un contenido de agua único, y un flujo inicial que maximiza la resistencia con un nivel apropiado de manejabilidad.

Pozo-Antonio (2015) estudio la evolución de las propiedades dinámicas, y la retracción por secado de morteros de cal. Por tal razón, hizo ensayos de manejabilidad de las mezclas en estado fresco, módulo dinámico de Young, resistencia a flexión y compresión, y retracción por secado. Para la elaboración de las muestras, utilizó masilla de cal apagada y dos tipos de cal natural hidráulica: NHL 2 y NHL 5; en cuanto a los agregados, hizo uso de materiales calcáreos. Para los morteros con cal NHL 5, el autor utilizó las proporciones cal : agregado 1:3.48 y 1:4.19, en peso. Para las mezclas con cal NHL 2, la dosificación fue 1:7.65, mientras que para los morteros con masilla de cal, fueron 1:2.86 y 1:3.43. El curado de los especímenes se realizó a una temperatura de 20 ± 5 °C. Para el estudio, se utilizaron tres humedades relativas en diferentes períodos: veintiocho días con un $90 \pm 5\%$ (28/0), catorce días a $90 \pm 5\%$ y catorce días a $70 \pm 5\%$ (14/14) y veintiocho días a $70 \pm 5\%$ (0/28). En los morteros con cal NHL 5, se obtuvieron las mayores resistencias a compresión, bajo las condiciones de curado 14/14; los valores registrados fueron de 2.2 MPa y 5.0 MPa, para las dosificaciones 1:4.19 Y 1:3.48 respectivamente. Para la mezcla con cal NHL 2, la resistencia a compresión osciló alrededor de 1.0 MPa para las tres metodologías de curado. En cuanto a las muestras con masilla de cal, las resistencias más altas se alcanzaron con un curado 0/28, con registros de 1.0 MPa y 1.2 MPa, con proporciones 1:2.86 y 1:3.43 correspondientemente. Por último, el autor concluye que el desarrollo de la rigidez de los morteros de cal se incrementa durante la hidratación de los componentes hidráulicos de los materiales. De igual manera, asevera que las condiciones de curado influyen en la resistencia mecánica, debido al desarrollo de las reacciones químicas que se presentan. Asimismo, el

investigador afirma que, de acuerdo a los resultados obtenidos, los morteros de cal pueden resistir movimientos de las unidades de mampostería en el tiempo.

Costigan, Pavía y Kinnane (2015), realizaron modelos para predecir el comportamiento mecánico a compresión, en mampostería no reforzada elaborada con morteros de cal. Aunque el enfoque de la investigación fue en mampostería, los autores previamente caracterizaron las mezclas empleadas, determinando la resistencia a flexión, compresión y módulo elástico a veintiocho y cincuenta y seis días, seis meses y un año. Para ello, utilizaron cuatro clases de cal: aérea hidratada, y cales hidráulicas naturales NHL 2.5, NHL 3.5 y NHL 5. Adicionalmente, usaron agregado silíceo. La relación cal : agregado utilizada por los investigadores fue 1:3 en peso. En lo referente a la resistencia a compresión a un año, el mortero con cal aérea hidratada, presentó un valor de 1.4 MPa. Del mismo modo, las mezclas con cales NHL 2, NHL 3.5 y NHL 5, tuvieron resistencias de 2.7 MPa, 10.0 MPa y 13.3 MPa, respectivamente. Las conclusiones de la investigación, enfatizan los resultados obtenidos en la mampostería, los cuales se tratarán más adelante en este documento.

2.1.2 Caracterización de morteros de cal, adicionados con metacaolín

Velosa, Rocha y Vega (2009) estudiaron la influencia de la composición química y mineralógica, en morteros de cal adicionados con metacaolín. Por tal razón, llevaron a cabo ensayos de difracción de rayos X para la caracterización mineralógica del metacaolín. Asimismo, realizaron pruebas de reactividad puzolánica, flexión, compresión y módulo dinámico de elasticidad. Para la investigación, utilizaron cal aérea en polvo, arena de río compuesta principalmente por cuarzo y tres tipos de metacaolín K1, K2 y K3 (ver Tabla 2-1); estos últimos provenían del mismo productor, pero presentaban diferencias en la procedencia de la materia prima y en los procesos de fabricación.

Tabla 2-1 Composición mineralógica de tres tipos de metacaolín

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)
K 1	62.62	28.63	1.07	0.15	0.06	1.57	3.46	0.36	2.00
K 2	59.90	32.29	1.28	0.17	0.04	0.24	2.83	0.36	2.80
K 3	62.48	28.72	1.01	0.13	0.03	2.45	3.55	0.34	1.20

Fuente: Tomada de (Velosa et al., 2009)

Teniendo en cuenta lo anterior, los investigadores fabricaron un mortero de referencia con relación cal : arena de 1:3 en volumen. Para las mezclas adicionadas con metacaolín, la proporción volumétrica cal : metacaolín : arena fue de 1:0.50:2.50. Posteriormente, el curado de las probetas con adición se llevó a cabo en bolsas plásticas por un período de siete días a 20 ± 2 °C. Después se dejaron a la misma temperatura y humedad relativa de $65 \pm 5\%$, hasta las edades de ensayo, veintiocho y noventa días. En cuanto a los resultados, los especímenes fabricados con cal y arena presentaron resistencias a compresión de 0.5 MPa y 0.8 MPa aproximadamente, a veintiocho y noventa días respectivamente. Para las muestras adicionadas con metacaolín K1, la resistencia resultó uniforme en las dos edades, con un registro de 0.7 MPa. En el caso de los elementos con metacaolín K2, los esfuerzos a compresión fueron de 2.6 MPa y 1.9 MPa, mientras que para los ejemplares fabricados con metacaolín K3, el esfuerzo fue de 2.4 MPa en ambas edades. En consecuencia, los autores atribuyeron la baja resistencia del mortero con metacaolín 1, a la falta de calcinación del metacaolín, por lo que la reacción puzolánica fue menor e hizo que la adición actuara como un agregado. Con relación a la mezcla con metacaolín 2, se apreció un decremento en la resistencia. Para esto, los investigadores afirmaron que tal caída se había observado en otros morteros adicionados con puzolanas, y tal fenómeno pudo estar relacionado con la retracción y la aparición de microfisuras. Por último, los autores concluyeron que los morteros adicionados con metacaolines ricos en caolinita y alúmina, presentaron las mayores resistencias. De igual modo, aseveraron que el tipo de metacaolín es un factor relevante.

Por otro lado, Aggelakopoulou, Bakolas y Moropoulou (2011) investigaron las propiedades de morteros de cal adicionados con metacaolín, para la restauración de mampostería histórica. Para ello, caracterizaron las mezclas por medio de análisis térmico y porosimetría por intrusión de mercurio. Adicionalmente, efectuaron pruebas de flexión y compresión a uno, tres, seis y doce meses. Los materiales empleados fueron cal en polvo hidratada, metacaolín y arena de cuarzo. Adicional a esto, las proporciones en peso cal:metacaolín:arena utilizadas, fueron 1:1:4.67, 1:0.50:3.50, 1:0.20:2.80 y 1:0.09:2.55. Una vez fabricados los especímenes de prueba, se curaron a temperatura de 20 ± 2 °C y humedad relativa de $95 \pm 5\%$ por los primeros tres días; posteriormente, se dejaron a la misma temperatura y humedad relativa de $65 \pm 5\%$. De otro lado, de los

resultados del ensayo a compresión de los morteros con proporciones 1:1:4.67 y 1:0.50:3.50, se registraron las mayores resistencias a tres meses de curado, alrededor de 16.0 MPa y 15.0 MPa respectivamente. Sin embargo entre tres y doce meses la resistencia decreció, hecho que los autores comparan con otras investigaciones como las de Chiaverni (2004) y Velosa et al. (2009). En cuanto a las mezclas con relaciones 1:0.20:2.80 y 1:0.09:2.55, la resistencia máxima se alcanzó a los seis meses, con valores de 8.0 MPa y 5.0 MPa aproximadamente. Después de dicho período, la resistencia también presentó un decremento. En conclusión, los autores afirmaron que los morteros estudiados, presentaron propiedades mecánicas necesarias para la rehabilitación de mampostería histórica. De igual manera, observaron propiedades mecánicas y micro estructurales, compatibles con la de materiales tradicionales. En lo referente a la pérdida de resistencia después de cierto tiempo, la atribuyeron a las micro fisuras, ocasionadas por la retracción de los morteros.

Vejmelková et al. (2012) estudiaron las propiedades mecánicas, hídricas y térmicas de morteros de cal, adicionados con metacaolín. Para esto, caracterizaron la estructura de poros, las propiedades hídricas y térmicas; también realizaron ensayos de flexión, compresión y resistencia a congelamiento. Para el estudio, los autores utilizaron cuatro marcas de cal aérea hidratada, arena con cuarzo y basalto y metacaolín. Adicionalmente, para la elaboración de los morteros, se utilizó una relación cal:metacaolín:arena de 1:3.61:0.20, en peso. Como muestra patrón, se utilizó solamente un tipo de cal, con una dosificación en peso cal : arena de 1:3. Asimismo, el ensayo de compresión se realizó a siete, catorce, veintiocho, cincuenta y seis y noventa días. De los resultados de los ensayos a compresión, los investigadores encontraron que la resistencia de los morteros adicionados se alcanzó a los veintiocho días, lo que indica que la reacción puzolánica terminó a esa edad; los valores registrados en las probetas con puzolana en dicha edad, fueron de 4.7 MPa a 6.8 MPa, mientras que la muestra patrón tuvo una resistencia de 0.7 MPa. De igual manera, el mortero más resistente resultó ser el más puro, es decir, el que presentaba mayor contenido de CaO; análogamente, la mezcla con menor contenido de pureza de CaO, presentó los menores registros. De acuerdo a lo anterior, los autores observaron mejoras en las propiedades mecánicas de los morteros adicionados con metacaolín, por lo que puede considerarse como un prerrequisito para aumentar la durabilidad de este tipo de materiales. También

afirmaron que el tipo de cal es un factor importante que influye en la durabilidad y las propiedades mecánicas e hídricas de los morteros.

2.1.3 Caracterización de morteros de cal, adicionados con polvo de ladrillo

Matias, Faria y Torres (2008) estudiaron morteros de cal, adicionados con polvo y granos de ladrillo. Por tal razón, realizaron pruebas de módulo dinámico de elasticidad, resistencia a flexión y compresión, absorción de agua por succión capilar y permeabilidad de vapor de agua. Para la fabricación de las muestras, los autores utilizaron arena de río, polvo y granos de ladrillo y cal aérea viva. Adicionalmente, fabricaron morteros de cal y arena con relaciones cal : arena de 1:3 y 1:6.14. También elaboraron mezclas con proporciones cal:polvo:arena de 1:0.5:3 y 1:0.57:6.14, cal:granos:arena de 1:1:2 y 1:1.37:4.10, y proporciones cal:polvo:granos:arena de 1:0.5:1:2 y 1:0.57:1.37:4.10. De otro lado, para las pruebas mecánicas, los investigadores hicieron prismas de 4 x 4 x 16 cm, los cuales fueron curados a una temperatura de 22 ± 2 °C y humedad relativa de $50 \pm 5\%$. Posteriormente, se realizaron ensayos de compresión a veintiocho días, obteniendo resistencias entre 0.2 MPa y 0.7 MPa en los morteros adicionados. En el caso de las mezclas de cal y arena, los valores fueron de 0.6 MPa y 0.4 MPa, para las relaciones 1:3 y 1:6.14, respectivamente. De acuerdo a lo determinado, los autores concluyeron que las resistencias a compresión de los morteros fabricados resultan aceptables para morteros de reparación, aunque consideran necesario tener en cuenta otros aspectos como las condiciones de soporte y factores climáticos, por lo que se hace necesario evaluar otros parámetros que permitan conocer el comportamiento de los morteros.

Nežerka et al. (2016), evaluaron el comportamiento de morteros de cal, adicionados con metacaolín y ladrillo triturado, en elementos de mampostería sometidos a carga excéntrica. Sin embargo, como parte de la investigación evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas. Los materiales utilizados por los autores fueron: cal aérea apagada, metacaolín, arena de río y ladrillo triturado, con tamaño de granos entre 0.2 cm y 0.5 cm. Asimismo, elaboraron tres morteros: el primero adicionado con metacaolín, con

una relación cal:metacaolín:arena de 0.7:0.3:3; las otras dos mezclas fueron adicionadas con metacaolín y ladrillo triturado, con proporciones cal:metacaolín:ladrillo:arena de 0.7:0.3:1.5:1 y 1:0.3:1.5:1. En lo referente a las muestras de ensayo, los autores fabricaron prismas de 4 x 4 x 16 cm, los cuales fueron curados a una temperatura de 20 ± 1 °C y humedad relativa entre 60% y 80%. Adicional a lo anterior, los ensayos mecánicos se ejecutaron cuando las muestras tenían una edad de noventa días. Las resistencias a compresión registradas en la investigación fueron 11.3 MPa para el mortero con relación cal:metacaolín:arena de 0.7:0.3:1, 14.7 MPa para la mezcla con proporciones cal:metacaolín:ladrillo:arena de 0.7:0.3:1.5:1 y 1.3 MPa para el que tenía una dosificación 1:0.3:1.5:1. Con base en los resultados, los investigadores evidenciaron que al añadir metacaolín en los morteros, la resistencia de estos aumentó. De igual manera, al reemplazar parcialmente granos de arena por ladrillo triturado, se mejoró también el comportamiento mecánico del mortero, teniendo la mayor resistencia. Dicho incremento se atribuyó a la reducción de la retracción por fraguado, debido a la presencia de fragmentos de ladrillo.

Navrátilová y Rovnaníková (2016), investigaron las propiedades puzolánicas de polvos de ladrillo, junto a sus efectos en las propiedades de morteros de cal. Para el estudio, caracterizaron el polvo de ladrillo, por lo que verificaron su composición química y mineralógica, la granulometría, la actividad puzolánica, el contenido de fases amorfas, el área específica, y la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaO . Adicional a lo anterior, en los morteros realizaron pruebas mecánicas de flexión y compresión, análisis térmico diferencial y microscopía de electrónica de barrido. Para la fabricación de los morteros, los investigadores utilizaron cal aérea hidratada, arena y seis clases de polvo de ladrillo, con tamaño de granos 0.03 cm y 0.1 cm provenientes de Libochovice y Hevlín, en República Checa, donde las temperaturas de cocción de ladrillos son de 780 °C y 900°C, respectivamente. En cuanto a las dosificaciones, se elaboró una mezcla patrón, con una relación cal : arena de 1:3, en peso. En cuanto a los morteros adicionados, se reemplazó el 50% de la cal por polvo de ladrillo, por lo que la proporción cal : polvo : arena fue de 0.5:0.5:3. Para las pruebas mecánicas se fabricaron probetas de 4x4x16 cm, las cuales se curaron a una temperatura de 21 ± 1 °C y humedad relativa de $50 \pm 5\%$, hasta las edades de ensayo: siete, veintiocho, noventa y ciento veinte días. De los resultados obtenidos, los autores observaron que la resistencia a compresión de la mezcla patrón evolucionó positivamente durante la investigación (ciento veinte días), con un valor medio

de unos 1.5 MPa, mientras que, para los morteros con polvo, se registraron compresiones entre 3.0 MPa y 7.0 MPa, para los diferentes tipos de polvo. Con base en lo obtenido, los investigadores concluyeron que la adición de polvo de ladrillo en morteros de cal, mejora las propiedades mecánicas de estos. Sin embargo, recomiendan tener en cuenta la composición química, el contenido de fases amorfas, el tamaño de granos y el área específica del polvo que se va a utilizar como adición en morteros de cal.

2.1.4 Carbonatación en morteros de cal

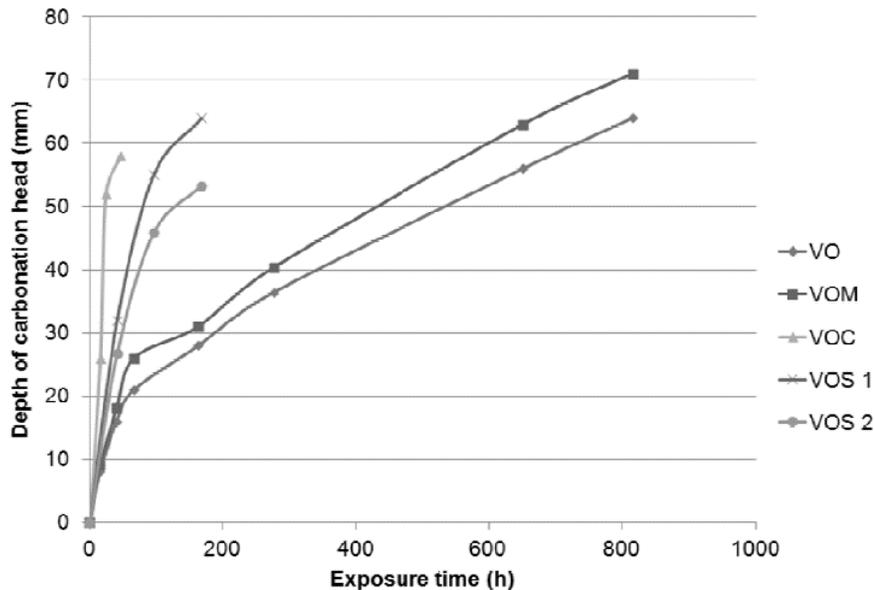
El-Turki, Ball y Allen (2009) estudiaron el efecto del proceso de carbonatación en las propiedades mecánicas y micro estructurales de morteros de cal. Para esto, evaluaron la pérdida de agua de las mezclas e hicieron pruebas de compresión, y microscopía electrónica de barrido. Adicional a ello, los investigadores utilizaron cal aérea y tres tipos de cal hidráulica: NHL 2, NHL 3.5 y NHL 5. En lo que respecta a la relación cal : arena, los autores usaron una proporción 1:2. Las probetas elaboradas, consistieron en cilindros de 1.8 cm de diámetro y 3.6 cm de altura. Una vez fabricadas, se dejaron endurecer a una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 50%, por un período de siete días. Posteriormente, el curado de las mismas se llevó a cabo en dos ambientes: uno con nitrógeno y el segundo con nitrógeno con contenido de CO₂ en un 0.04%. La temperatura de curado fue de 20 °C y la humedad relativa de 65%. De otro lado, los ensayos a compresión de las muestras se realizaron a catorce, veintiocho y cincuenta y seis días de curado. De las resistencias a compresión, los autores observaron que los mayores registros se obtuvieron a cincuenta seis días. Para el mortero elaborado con cal aérea, se obtuvieron esfuerzos cercanos a 0.4 MPa y 1.1 MPa, en las muestras sin carbonatar y carbonatadas, respectivamente. En el caso de las mezclas con cal NHL 2, se registró una resistencia alrededor de 1.0 MPa en las muestras no carbonatadas, mientras que, en las carbonatadas, dicho valor fue de unos 2.8 MPa. De igual forma, en las probetas sin carbonatar con cal NHL 3, la resistencia fue cercana a 1.0 MPa, mientras que, en los elementos carbonatados, fue de unos 3.0 MPa. Para los especímenes con cal NHL 5, la resistencia de los cilindros sin carbonatar fue cercana a 1.5 MPa; en los elementos carbonatados, dicho valor fue cercano a 4.5 MPa. Del estudio, los investigadores concluyeron que la carbonatación tuvo un efecto notable en la resistencia

de los morteros. También afirmaron que la pérdida de agua densifica la microestructura de las mezclas, lo cual se refleja en aumentos de resistencia.

Arizzi, Martínez y Cultrone (2011), evaluaron la evolución mecánica de morteros de cal, durante el proceso de carbonatación. Por ende, realizaron pruebas de microscopía óptica, difracción de rayos X, con el fin de observar la microestructura y las fases minerales de los morteros. Adicionalmente, hicieron ensayos de compresión a quince, veintiocho y sesenta días. Para la elaboración de los morteros, los investigadores utilizaron cal aérea hidratada y tres tipos de agregado: agregado calcítico con gradación discontinua (CDA) y continua (CA), y agregado silíceo con granulometría discontinua (SA). Adicional a lo anterior, para los morteros con agregado CA se utilizaron relaciones cal:agregado, en peso, de 1:2, 1:3, 1:4 y 1:6. En el caso de las mezclas con agregados CDA y SA, las dosificaciones fueron de 1:3. Las probetas de ensayo consistieron en prismas de 4 x 4 x 12 cm, que se dejaron endurecer por siete días a una temperatura de 20 ± 5 °C y humedad relativa de $60 \pm 5\%$. Posteriormente, los especímenes se cortaron para tener ejemplares de 4 x 4 x 5 cm y de estos se sacaron cubos de 1 cm de arista de la zona exterior e interior de los prismas, para realizar ensayos de compresión en las edades especificadas. Las resistencias registradas evolucionaron en el tiempo, y el mayor valor en todos los morteros se obtuvo a sesenta días. De igual manera, las resistencias de los cubos correspondientes a la zona externa de los prismas fabricados, fueron de 1.1 MPa a 1.7 MPa, a sesenta días. En cuanto a los elementos extraídos de la parte interna de los prismas, se obtuvieron esfuerzos entre 0.9 MPa y 1.2 MPa, sin cambios significativos entre edades. Asimismo, los autores encontraron que la resistencia de las muestras externas resultó siempre mayor que la de las internas, lo cual confirmó que el proceso de carbonatación se presenta desde la zona exterior hacia el interior de los morteros. Por esa misma razón, no se presentaron incrementos notables en las resistencias de los cubos de la zona interna de las muestras. Como conclusión, los investigadores afirman que el proceso de carbonatación afecta de forma positiva las propiedades mecánicas de los morteros, resultando en incrementos de la resistencia de estos. De igual manera, concluyen que el uso de agregados calcáreos da lugar a morteros más resistentes, puesto que los granos del agregado silíceo no generan suficiente cohesión con la matriz.

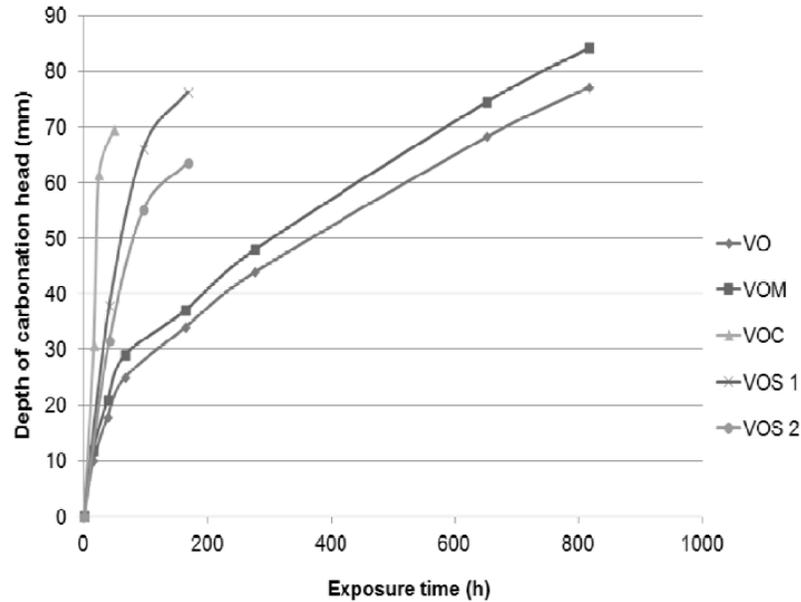
Pavlík et al. (2012) también estudiaron el proceso de carbonatación en morteros de cal, midiendo la profundidad de carbonatación y el incremento de masa de las mezclas. Para

ello, utilizaron cal hidratada, metacaolín y agregados silíceos. Adicionalmente, los autores fabricaron dos tipos de mortero: el primero con una proporción cal:arena de 1:3 (VO), mientras que la otra mezcla se preparó con una relación cal:arena:metacaolín de 1:3:0.25 (VOM). Asimismo, fabricaron cilindros de 7 cm de diámetro y 10 cm de altura, y cilindros de 3 cm de diámetro y 5 cm de altura. Posteriormente, las muestras se humedecieron a diario por tres días, antes de desmoldarlas y se curaron por veinticinco días a una temperatura de 22 ± 5 °C y humedad relativa de $40 \pm 10\%$. Posteriormente, los investigadores sometieron las probetas a un proceso de carbonatación acelerada, utilizando una cámara de carbonatación con temperatura de 30 °C y humedad relativa de $70 \pm 10\%$. De igual forma, se emplearon dos concentraciones de CO₂: 5% y 10%. Para el estudio de las tasas de carbonatación en los morteros fabricados, se midió la profundidad de carbonatación a dieciséis, cuarenta, sesenta y seis, ciento sesenta y cuatro, seiscientos cincuenta y dos y ochocientas horas, utilizando dos métodos: colorimétrico y gravimétrico. En la Gráfica 2-1 se presentan las profundidades de carbonatación con una concentración de CO₂ del 5%, mientras que en la Gráfica 2-2 se muestran los resultados para un 10% de CO₂. Las muestras denotadas como VOC, VOS 1 y VOS 2, corresponden a mezclas secas prefabricadas.



Gráfica 2-1 Profundidad de carbonatación con concentración del 5% de CO₂

Fuente: Tomado de (Pavlik et al., 2012)



Gráfica 2-2 Profundidad de carbonatación con concentración del 10% de CO₂

Fuente: Tomado de (Pavlík et al., 2012)

De los resultados obtenidos, los investigadores observaron que la tasa de carbonatación de las muestras sometidas a un ambiente con 10% de CO₂, resultó mayor en un 20% a la registrada en una atmósfera con 5% de dióxido de carbono. Sin embargo, en ambos casos la carbonatación de los especímenes no concluyó a 820 horas. Finalmente, los autores evidenciaron que la dinámica del proceso de carbonatación fue similar entre los métodos colorimétrico y gravimétrico. Asimismo, concluyeron que la tasa de carbonatación del mortero de cal y arena, resultó similar a la registrada en la mezcla adicionada con metacaolín.

2.1.5 Mampostería sentada en morteros de cal

Como se mencionó previamente, Costigan, Pavía y Kinnane (2015), desarrollaron modelos para predecir el comportamiento mecánico a compresión, en mampostería elaborada con morteros de cal. Para ello, utilizaron ladrillos de arcilla cocida y cuatro tipos de cal: aérea hidratada (CL90s), NHL 2, NHL 3.5 y NHL 5.

De otro lado, la primera parte del estudio, se concentró en la caracterización de los materiales de forma individual. Los resultados obtenidos en los morteros se presentaron con anterioridad. En cuanto a las unidades de mampostería, se evaluaron las

resistencias a compresión y flexión, el módulo elástico, la densidad, la porosidad abierta y la tasa inicial de absorción. Los resultados obtenidos de las pruebas de compresión y flexión fueron 15.0 MPa y 2.6 MPa, respectivamente.

Una vez caracterizados los materiales de forma individual, se procedió a construir muretes, de acuerdo a lo dispuesto en la norma EN 1052-1. Posteriormente, se ejecutaron ensayos de compresión y módulo elástico en las muestras, a veintiocho y cincuenta y seis días, seis meses y un año. En la Tabla 2-2 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 2-2 Propiedades mecánicas en mampostería

Mortero	28 días		56 días		6 meses		1 año	
	f'_m (MPa)	E_m (MPa)	f'_m (MPa)	E_m (MPa)	f'_m (MPa)	E_m (MPa)	f'_m (MPa)	E_m (MPa)
CL90s	0.9	196	1.5	244	3.9	296	4.3	317
NHL 2	3.9	302	4.5	361	4.8	504	4.8	542
NHL 3.5	5.0	385	5.9	568	7.7	842	8.9	970
NHL 5	5.4	607	6.3	993	8.0	1409	8.5	1528

Fuente: Tomado de (Costigan et al., 2015). Modificado por el autor.

De acuerdo a lo evidenciado por los autores, en los muretes con cales CL90s y NHL 2, se registraron grandes deformaciones, mientras que, en las muestras con los otros tipos de cal, se presentó una deformación plástica inicial, seguida por una deformación lineal entre el 30% y 60% del esfuerzo último, presentando en última instancia un comportamiento no lineal hasta el esfuerzo máximo, para descender hasta el esfuerzo de falla. Asimismo, de acuerdo con los resultados obtenidos, los investigadores encontraron

que el módulo elástico se encuentra entre 82 y 231 veces la resistencia a compresión. De igual manera, encontraron que a medida que el grado hidráulico del mortero aumenta, la pendiente de correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico, disminuye.

Por último, los autores concluyen que a medida que aumenta el grado hidráulico de los morteros, la influencia de la rigidez de la mampostería en la resistencia a compresión, disminuye. Asimismo, a medida que la resistencia de la mampostería alcanza su máximo valor, se reduce la rigidez de ésta, debido a los mecanismos de falla asociados con la capacidad lateral de tensión de los ladrillos.

2.1.6 Mampostería reforzada con cuerdas de acero.

Borri, Castori y Corradi (2011), estudiaron el comportamiento al corte en paneles de mampostería, reforzados con cuerdas de acero de alta resistencia, embebidas en una matriz cementicia. Para ello, los investigadores utilizaron dos morteros: uno de cal y otro de cemento, con relación arena:aglomerante de 1:2. Para el refuerzo, emplearon dos tipos de cuerda de acero de alta resistencia: 3X2 (Tipo 1) y 3SX (Tipo 2); la diferencia entre estas, se encuentra en el número de alambres que conforma las cuerdas.

La primera fase del estudio, consistió en la caracterización de los materiales por separado, por lo que se ejecutaron ensayos de flexión y compresión, tanto en los morteros como en los ladrillos. Adicional a esto, se realizaron pruebas de tensión en las cuerdas de acero, obteniendo así su módulo elástico y su resistencia última. Posteriormente, se evaluó la adherencia entre las cuerdas de acero embebidas en mortero, con la mampostería. Para esto se ejecutaron ensayos de corte directo y pull-off.

Después de caracterizar los materiales, los investigadores procedieron a construir muretes de 51.5 cm de alto, 51.1 cm de largo y 12.5 cm de espesor. Para el reforzamiento de estos, se colocaron las tiras de acero, embebidas en una matriz de mortero, en franjas de 5.0 cm y 2.5 cm de ancho, formando una malla de refuerzo, tal y como se observa en la Figura 2-1. En total se fabricaron 17 muretes, de los cuales 6 no tenían ningún tipo de refuerzo, 5 estaban reforzados con las cuerdas Tipo 1 (3 en las dos caras y 2 en una cara); los ejemplares restantes, se reforzaron con el refuerzo Tipo 2 (4 en las dos caras y 2 en una cara). Dichos ejemplares fueron sometidos a ensayos de

compresión diagonal, para evaluar el módulo de rigidez a cortante y el esfuerzo cortante máximo.

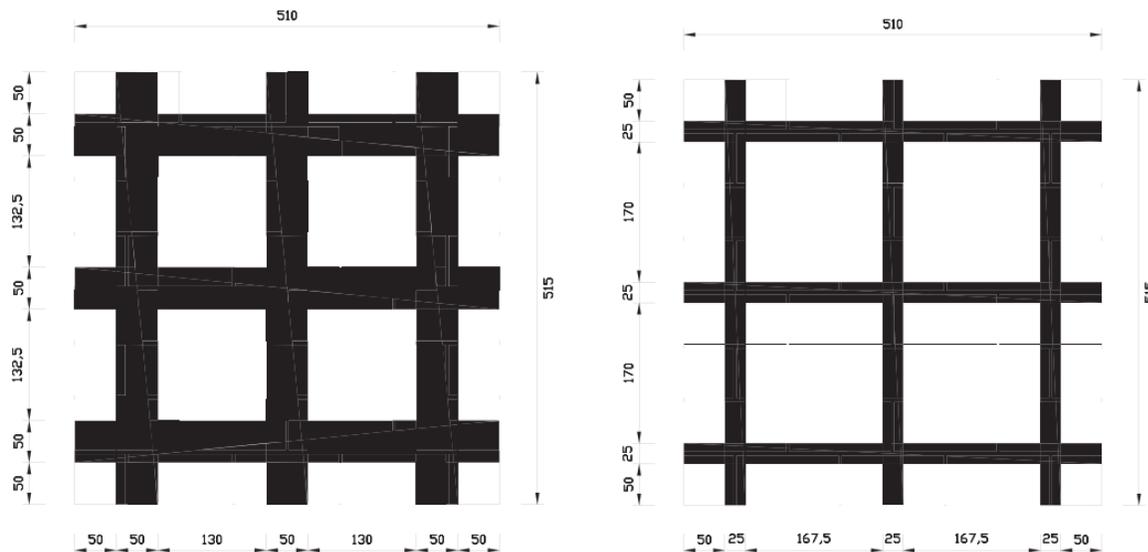


Figura 2-1 Reforzamiento de mampostería con cuerdas de acero de alta resistencia

Fuente: Tomado de (Borri et al., 2011)

Para mejorar la comprensión de los resultados obtenidos, en la Tabla 2-3 se presentan los especímenes ensayados por los investigadores, el tipo de refuerzo, las caras reforzadas, el ancho de la franja de refuerzo, el esfuerzo máximo y el módulo de rigidez a cortante de la mampostería. Adicional a lo anterior, las muestras no reforzadas presentaron un comportamiento frágil, con fisuras a lo largo de la diagonal comprimida; en el caso de los elementos reforzados, la falla se presentó en las juntas de mortero, localizada en la zona central de los muretes.

Tabla 2-3 Resistencia a compresión diagonal en mampostería reforzada con cables de acero de alta resistencia.

Muestras	Tipo de refuerzo	Caras reforzadas	Ancho de refuerzo (cm)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	G_m (MPa)
1-2-3-4-5-6	-	-	-	0.1	36
7-8	2	2	5.0	0.4	377

Tabla 2-3 (Continuación)

Muestras	Tipo de refuerzo	Caras reforzadas	Ancho de refuerzo (cm)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	G_m (MPa)
9-10	2	2	2.5	0.3	92
11-12	2	1	5.0	0.2	344
13-14	1	2	2.5	0.2	39
15	1	2	5.0	0.3	397
16-17	1	1	5.0	0.3	337

Fuente: Tomado de (Borri et al., 2011). Modificado por el autor.

Por último, los investigadores evidenciaron un aumento en la resistencia de los muretes reforzadas por ambas caras, en comparación con los reforzados por una. De igual modo, observaron que los elementos reforzados con franjas de mortero de 5.0 cm, presentaron mayor resistencia que los reforzados con anchos de 2.5 cm. Asimismo, se presentó un aumento en la rigidez al corte en los especímenes reforzados. Adicionalmente, los autores concluyeron que, al utilizar mortero reforzado, podrían reducirse cantidades de material y costos de instalación, en comparación con un reforzamiento con FRP.

2.1.7 Mampostería reforzada con FRCM

Carozzi, Milani y Poggi (2014), estudiaron propiedades mecánicas de sistemas de reforzamiento con FRCM, en mampostería. De igual modo, desarrollaron modelos analíticos y numéricos para estudiar el comportamiento de dichos sistemas. Para el refuerzo, los autores utilizaron malla de fibra de vidrio, morteros de cemento y cal y ladrillos históricos y modernos, con dimensiones nominales largo x ancho x alto de 25 x 12 x 5.5 cm. La primera etapa de la investigación, consistió en la caracterización de los materiales. En el caso de las fibras, se ejecutaron pruebas de tensión. En los morteros se desarrollaron ensayos de flexión y compresión, mientras que, en las unidades cerámicas, se evaluó la resistencia a compresión, el módulo elástico y la tasa inicial de absorción. Posteriormente, se realizaron pruebas de adherencia en ladrillos reforzados; también se evaluó la adherencia entre los morteros y las fibras, por medio de pruebas de tensión. Asimismo, se realizaron ensayos de tensión en probetas de mampostería reforzada. En la última fase, los investigadores plantearon modelos analíticos y

numéricos, para determinar el comportamiento del refuerzo utilizado. Finalmente, los autores concluyeron que los resultados experimentales, demostraron que la resistencia última, depende de la superficie reforzada y del tipo de mortero que se utilice.

Bellini et al. (2017), evaluaron la efectividad de utilizar FRCM, para reforzar muros de mampostería, sometidos a carga axial y fuerza perpendicular al plano. Para esto, utilizaron tres tipos de refuerzo: el primero consistió en una malla bidireccional de fibras de vidrio, impregnada con un agente para adhesión (GFRCM_01). La segunda alternativa correspondía a una malla similar a la primera, aunque sin el agente para adherencia (GFRCM_02). La última opción fue una malla unidireccional de fibras de acero (SRG_01). Adicional a lo anterior, para la elaboración de las muestras, se caracterizaron los materiales por separado. En el caso de los morteros utilizados, se fabricaron prismas de 4 x 4 x 16 cm, sobre los que se efectuaron ensayos de flexión, para posteriormente utilizar las mitades y someterlas a compresión. Para la caracterización de los ladrillos, se extrajeron núcleos de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, en dirección paralela y perpendicular a la cara de apoyo del ladrillo. De igual manera, se desarrollaron pruebas de flexión en unidades cerámicas. De otro lado, se construyeron muros con dimensiones largo x ancho x alto de 120 x 25 x 270 cm. Para esto, se utilizaron ladrillos de arcilla cocida, con resistencia baja-media. Del mismo modo, para las juntas se utilizó mortero de cal hidráulica. Los muros se dejaron curar por 2 meses, bajo condiciones de laboratorio. Posteriormente, se les aplicó una precarga axial, que generó un esfuerzo de 0.20 MPa, con el fin de simular un muro de una edificación real, antes de ser reforzada. Una vez realizada la precarga, se reforzaron los especímenes por la cara que estaría sometida a tensión durante el ensayo. Con esto, para los ejemplares reforzados con fibras de vidrio, se emplearon mallas de 100 cm de ancho, en toda la altura del muro, mientras que, para el refuerzo de acero, se utilizaron tres tiras de 10 cm de ancho. Después de esto, los ejemplares se sometieron a flexión perpendicular al plano (ver Fotografía 2-1), obteniendo los siguientes resultados: momentos máximos de 22.4 kN-m, 19.0 kN-m y 30.1 kN.m, para los muros reforzados con GFRCM_01, GFRCM_02 Y SRG_01, respectivamente. De igual forma, el modo de falla identificado, fue la falla de las fibras por tensión, la cual se presentó antes de que se perdiera la adherencia entre el refuerzo y el mortero. Por último, los investigadores

concluyeron que las alternativas de refuerzo estudiadas resultaron efectivas, puesto que previnieron la formación de rótulas en la mitad de la altura del muro, redistribuyendo los esfuerzos a lo largo del mismo.



Fotografía 2-1 Ensayo de flexión perpendicular al plano en muros reforzados con FRCM

Fuente: Tomado de (Bellini et al., 2017)

2.1.8 Mampostería reforzada con barras de FRP

Turco et al. (2006), reforzaron muretes de mampostería, para estudiar su comportamiento a flexión y cortante. Para esto, los investigadores emplearon unidades de mampostería de concreto, con dimensiones de 15 x 20 x 40 cm y 10 x 20 x 40 cm. También trabajaron con ladrillos de arcilla cocida de 10 x 20 x 6.5 cm. Para las juntas, utilizaron mortero de cemento tipo N. Asimismo, para el reforzamiento de los elementos, usaron barras de fibra de vidrio (GFRP), con sección transversal circular, con diámetros nominales de 0.64 cm y 0.94 cm, y barras rectangulares de 0.21 x 1.52 cm. Adicionalmente, para embeber las barras en los muros, hicieron uso de dos pastas: una epóxica y otra cementicia, modificada con latex.

La primera fase de la investigación, consistió en la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados. De este modo, se realizaron pruebas de compresión en las unidades de mampostería, obteniendo resistencia entre 10.5 MPa y 11.4 MPa para los ladrillos de concreto, y entre 19.4 y 15.8 MPa en los de arcilla. Del mismo modo, se determinó la resistencia a compresión del mortero tipo N a veintiocho días, obteniendo un valor de 7.6 MPa. En las barras de GFRP, se midió la resistencia a tensión, la cual se encontró entre 760 MPa y 1 102 MPa. En esta prueba, también se determinó el módulo elástico, obteniendo registros entre 40 800 MPa y 50 163 MPa. Por último, se ejecutaron ensayos de tensión indirecta, en las pastas utilizadas para el reforzamiento a siete y veintiocho días. Para la segunda edad, la resistencia de 5.6 MPa en la pasta cementicia modificada con latex, mientras que en la pasta epóxica dicho valor fue de 18.5 MPa.

Una vez evaluadas las propiedades mecánicas de los materiales, se construyeron veinte muretes: tres con unidades de arcilla y los restantes con unidades de concreto. Los elementos de mampostería de arcilla tenían dimensiones alto x largo x ancho de 122 x 61 x 9.5 cm, mientras que los de concreto tenían espesores entre 9.2 cm y 14.3 cm. Adicional a lo anterior, los especímenes se reforzaron verticalmente, con diferentes cuantías de refuerzo y se sometieron a flexión perpendicular al plano, por medio de ciclos de carga y descarga. Los momentos máximos registrados, se encontraron entre 1.6

kN·m y 8.0 kN·m, y los mecanismos de falla fueron por adherencia y por cortante en las zonas cercanas a los apoyos.

De otro lado, para estudiar el comportamiento a cortante, se construyeron seis muretes con dimensiones alto x largo x ancho de 160 x 160 x 15 cm, utilizando unidades de concreto, y fueron sometidos a compresión diagonal. Asimismo, los elementos se reforzaron horizontalmente, colocando las barras de FRP en las juntas, de tres maneras: la primera consistió en colocar las barras en todas las juntas del murete, por una de las caras. En la segunda metodología, se instalaron barras cada dos juntas horizontales, en una de las caras del elemento, mientras que, en la tercera alternativa, se hizo en ambas caras del espécimen. Las cargas máximas soportadas por las muestras se encontraron entre 108 kN y 241 kN, presentando fisuración a lo largo de la diagonal.

Finalmente, los investigadores observaron que los resultados encontrados en las técnicas de reforzamiento utilizadas, demostraron potencial para ser utilizadas en estructuras de mampostería. Del mismo modo, afirmaron que las barras circulares resultaron apropiadas para el reforzamiento a cortante, mientras que las barras rectangulares tuvieron buen comportamiento en el caso del reforzamiento a flexión. Adicional a lo anterior, los autores concluyeron que los sistemas de baja adherencia son preferibles para el reforzamiento a cortante, puesto que permiten cierto deslizamiento y mejoran la redistribución de esfuerzos. En cuanto a las pastas utilizadas, se obtuvieron resultados similares, siendo la única diferencia, la necesidad de una ranura más grande para pasta cementicia, en el caso del refuerzo a flexión, resultando más económica y con la ventaja de mantener la apariencia original del muro, lo cual la hace más atractiva para ser utilizada en reforzamiento.

2.2 Estudios nacionales

2.2.1 Caracterización físico-química y mineralógica de morteros de cal

Cañón (2012) caracterizó morteros de los puentes Cauca y Ortiz, ubicados en Popayán y Cali, respectivamente. Para esto, hizo uso de las técnicas de difracción de rayos X, calorimetría diferencial de barrido, espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier,

microscopía electrónica de barrido, desagregación y granulometría del mortero. Todo esto se realizó en mezclas de las juntas y revoques de las estructuras. Después de esto, el autor elaboró 9 mezclas, en las que ejecutó ensayos de difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier y pruebas de compresión. De acuerdo con los resultados, seleccionó los morteros más compatibles con los antiguos.

Por otra parte, para determinar la proporción de aglomerante y agregado de los morteros, se realizó un desglose mecánico, por medio de un agitador magnético de baja frecuencia, en un medio acuoso. Posteriormente, se secó el agregado y se tamizó para determinar la distribución de tamaño de granos. De esta manera, se determinaron los porcentajes correspondientes de aglomerante y agregado. Para el caso de las muestras extraídas del puente Cauca, se obtuvo una relación aglomerante:arena de 1:2.32 en el mortero de pega y 1:1.83 en el de revoque. Para el caso de la mezcla del puente Ortiz, las proporciones fueron 1:2.71 en el mortero de pega, mientras que en el de revoque fue de 1:1.89.

Una vez caracterizados los morteros antiguos, el autor fabricó nueve morteros, con el propósito de obtener propiedades idénticas a la de las mezclas estudiadas previamente. Para ello, se utilizó roca caliza quemada en horno artesanal y arena cuarcítica, extraída de ríos. Del mismo modo, el investigador utilizó tres proporciones aglomerante:arena: 1:2, 1:2.5 y 1:3, con diferentes cantidades de agua. Para la caracterización de los morteros, se realizaron pruebas de difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier y resistencia a compresión a sesenta días.

De otro lado, las resistencias a compresión de los morteros se encontraron entre 0.3 MPa y 0.8 MPa. El mayor valor se registró en uno de los morteros con proporción 1:2. Sin embargo, la menor resistencia se presentó en una mezcla con dicha dosificación, aunque con mayor contenido de agua.

Finalmente, Cañón seleccionó el mortero que presentó mayor resistencia a compresión, como mortero de restauración en las juntas de los puentes de estudio, debido a su capacidad para soportar muros con mayor carga. Asimismo, para la restauración de revoques, seleccionó la mezcla que presentó menor resistencia, por ser la más calcítica y por ofrecer mayor impermeabilidad.

2.2.2 Caracterización de ladrillo patrimonial sentado en mortero de cal y arena

En la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá), Torres et al. (2016), realizaron un estudio para la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), con el objetivo de caracterizar mampostería en ladrillo patrimonial, sentado en mortero de cal y arena. La investigación se ejecutó en tres fases: caracterización de muestras extraídas de edificaciones patrimoniales y de un depósito de demolición. Posteriormente, realizaron una caracterización preliminar de morteros de cal, y, por último, desarrollaron ensayos en los materiales seleccionados, por separado, y la interacción de estos.

Como se mencionó con anterioridad, la primera parte del proyecto consistió en la caracterización de muestras extraídas de tres edificaciones antiguas, ubicadas en el Centro Histórico de Bogotá (Casa Tito, Casa Abadía Méndez y Plaza Distrital de Mercado La Concordia). En estas, se extrajeron muretes, mortero de pega y unidades de arcilla. Los ensayos ejecutados en los morteros obtenidos fueron: desagregación, contenido de humedad y resistencia a compresión en cubos. En las unidades de arcilla, se ejecutaron las siguientes pruebas: composición mineralógica (fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X), resistencia a compresión, absorción, tasa inicial de absorción, densidad y módulo de rotura. Finalmente, visualmente se clasificaron los tipos de unidades de los muretes, al igual que la configuración de los mismos. Adicionalmente, en estos se ejecutaron pruebas de compresión para determinar la resistencia y el módulo elástico. Del mismo modo, en un depósito de demolición, los investigadores adquirieron unidades de arcilla patrimoniales (rosadas, recocidas y de fachada). Para su caracterización se realizaron las mismas pruebas mencionadas previamente, con excepción de la composición mineralógica. En la Tabla 2-4 se presentan los resultados obtenidos de las propiedades de los ladrillos, mientras que en la Tabla 2-5, se muestran las propiedades mecánicas de los muretes ensayados.

Tabla 2-4 Propiedades físicas y mecánicas en unidades de arcilla patrimoniales

	f'_{cu} (MPa)	Absorción (%)	TIA (%)	Densidad (kg/m ³)	MR (MPa)
UNIDADES EXTRAÍDAS EN VISITAS TÉCNICAS					
Casa Tito	10,0 – 46,9	-	-	-	-
Casa Abadía Méndez	23,3	14,6	0,25	1824	2,2
Plaza La Concordia	28,0	11,0	0,19	1886	3,4
DEPÓSITO DE DEMOLICIÓN					
Unidad Rosada	18,9	16,3	0,29	1667	1,9
Unidad Recocida	39,6	3,2	0,02	2038	4,5
Unidad de Fachada	14,4	12,6	0,07	1818	2,1

Fuente: Tomado de (Torres et al., 2016)

Tabla 2-5 Propiedades mecánicas en muretes obtenidos en edificaciones patrimoniales

	f'_m (MPa)	E_m (MPa)
Casa Tito	5,9	4500
Casa Abadía Méndez	2,2	480
Plaza La Concordia	6,6	1600

Fuente: Tomado de (Torres et al., 2016)

En segunda instancia, para seleccionar los morteros de pega con los que se fabricarían los especímenes de ensayo en el laboratorio, los investigadores fabricaron ocho morteros, utilizando tres tipos de cal (Calco, Promical y La Concordia) y arena de peña, con proporciones cal:arena de 1.25:3, 1:3 y 1:4. Para la fabricación de las mezclas, se buscó una fluidez del 100% o cercana. Adicionalmente, fabricaron cubos de 5 cm de arista, de los cuales, la mitad se dejó al aire libre, y los restantes se colocaron en una cámara de carbonatación acelerada, con los siguientes parámetros: temperatura de 23°C, humedad relativa del 65% y concentración de dióxido de carbono del 10%. Posteriormente, ejecutaron ensayos de compresión en las muestras a catorce, veintiocho y cincuenta y seis días. En los cubos sin carbonatar, registraron resistencias entre 1.14 MPa y 1.82 MPa, a una edad de cincuenta y seis días; en los especímenes carbonatados, los valores fueron de 3.59 MPa a 9.73 MPa.

Para la última etapa, los autores seleccionaron dos morteros con proporciones 1:3, utilizando cales Calco y La Concordia. Del mismo modo, de acuerdo a lo observado en

De otro lado, en los morteros fabricados, se realizaron ensayos de compresión a tres, catorce, veintiocho y cincuenta y seis días. En estos, también se desarrollaron pruebas de sortividad a cuatro edades. Cabe mencionar que la mitad de las muestras de mortero se dejaron al aire, mientras que los restantes se introdujeron en una cámara de carbonatación. En los ladrillos se evaluó la resistencia a compresión, la absorción, la tasa inicial de absorción, la densidad y el módulo de rotura. Del mismo modo, en los muretes, se estudió la resistencia a compresión, el módulo elástico y la resistencia al corte por compresión diagonal. Por último, se caracterizó la interacción entre unidades de mampostería y el mortero, por medio de ensayos de corte directo ladrillo – mortero, y adherencia entre la mezcla y el ladrillo.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 2-6 se presentan las resistencias a compresión de los morteros carbonatados y sin carbonatar. De igual manera, en la Tabla 2-7 se indican las siguientes propiedades, evaluadas en unidades de arcilla patrimonial: resistencia compresión, absorción y módulo de rotura. Asimismo, en la Tabla 2-8 se muestran las propiedades evaluadas por los autores, en muretes de mampostería.

Tabla 2-6 Resistencia a compresión de morteros de cal, carbonatados y no carbonatados

	f'cp (MPa)
Concordia - Carbonatado	4.7
Concordia – No carbonatado	1.3
Concordia - Carbonatado	3.4
Concordia – No carbonatado	1.8

Fuente: Elaboración propia con base a Torres et al. (2016)

Tabla 2-7 Propiedades de unidades de mampostería patrimonial

Propiedad	f'cu (MPa)	% absorción	MR (MPa)
Tipo unidad			
Rosada	14.8	16.1	2.0
Recocida	28.8	8.6	4.6

Fuente: Elaboración propia con base a Torres et al. (2016)

Tabla 2-8 Propiedades de mampostería patrimonial, sentada en mortero de cal y arena

Murete	Propiedad	f'_m (MPa)	E_m (MPa)	τ_m (MPa)
	Unidad y media – Calco - Carbonatado	3.6	396	86.2
	Unidad y media – Calco – No carbonatado	2.8	377	35.5
	Unidad y media – Concordia – Carbonatado	3.4	451	92.4
	Unidad y media – Concordia – No carbonatado	3.0	369	44.7
	Calco – Tizón	2.2	206	36.2
	Concordia – Tizón	2.7	143	70.3
	Calco – Belga	2.7	227	47.9
	Concordia - Belga	1.9	169	68.8

Fuente: Elaboración propia con base a Torres et al. (2016)

Los autores evidenciaron un aumento en la resistencia a compresión, en los morteros sometidos al proceso de carbonatación. Asimismo, el modo de falla detectado en las pruebas de compresión en muretes, correspondió a la falla de las unidades de arcilla por tensión, aplastamiento del mortero y pérdida de adherencia en las juntas. Finalmente, los investigadores recomendaron seis alternativas de reforzamiento para este tipo de mampostería; entre ellas: utilizar malla electrosoldada cubierta con pañete, elementos de confinamiento, láminas o tejidos de FRP, barras de FRP embebidas en las juntas, cables de acero embebidos en mortero y matriz cementicia reforzada con tejidos (FRCM).

De acuerdo con lo consultado en el estado del arte, se puede concluir que los morteros de cal y arena, presentan tasas muy bajas de endurecimiento, incidiendo en su baja resistencia. Sin embargo, con base en numerosas investigaciones, se ha demostrado que el uso de adiciones cementantes como el metacaolín o polvo de ladrillo, mejoran ciertas propiedades mecánicas de las mezclas. Por esta razón, los morteros de cal adicionados resultan atractivos para rehabilitaciones de edificaciones históricas, ya que son compatibles con los morteros originales y mantienen el valor patrimonial e histórico de la edificación. De otro lado, se encontró que el proceso de carbonatación influye en la resistencia de los morteros de cal. Asimismo, se evidenciaron diferentes metodologías de reforzamiento en mampostería sentada en morteros de cal y arena, concluyendo que permiten aumentar la resistencia de la mampostería y salvaguardar su valor arquitectónico.

Con base en lo anterior, se decidió realizar la presente investigación que involucró el diseño de mezclas de mortero de cal y arena, adicionado con polvo de ladrillo y metacaolín, con el objetivo de evaluar la constante de carbonatación de los morteros, por medio de un proceso de carbonatación acelerada. De esta forma, se buscó seleccionar el mejor mortero para construir muretes de mampostería. Estos últimos se reforzaron con dos alternativas propuestas por Torres et al. (2016): malla electrosoldada embebida en mortero y barras de GFRP en las junta. De este modo se evaluaron las propiedades mecánicas de la mampostería, comparando las resistencias de elementos reforzados y no reforzados. Lo anterior, se hizo en busca de promover la investigación en reforzamiento de mampostería patrimonial, utilizando materiales compatibles con los originales, salvaguardando la vida de sus ocupantes y su valor histórico y arquitectónico.

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos. Con estos se pretende hacer un aporte al reforzamiento de mampostería patrimonial sentada en morteros de cal y arena y al estudio de las mezclas y sus propiedades con materiales disponibles en el mercado colombiano.

3.OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Estudiar el desarrollo de resistencia en morteros de cal y arena y morteros de cal adicionados, para utilizarlos en rehabilitación y reforzamiento de mampostería patrimonial

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de unidades patrimoniales de arcilla.
- Fabricar un mortero de cal que presente alta resistencia temprana.
- Estudiar el uso de polvo de ladrillo y metacaolín como adiciones en morteros de cal, y su influencia en el desarrollo de resistencia y velocidad de carbonatación en las mezclas.
- Evaluar la resistencia a compresión en probetas de mortero expuestas al aire y a carbonatación acelerada.
- Determinar la profundidad del frente carbonatación en muestras de mortero, sometidas a carbonatación acelerada. Encontrar la constante de carbonatación acelerada de las muestras de estudio.
- Evaluar la resistencia a compresión y al corte , en muros de mampostería de arcilla cocida, sentada sobre mortero de cal utilizando diferentes alternativas de reforzamiento
- Estimar la correlación existente entre la resistencia a compresión y el módulo elástico en muretes de mampostería patrimonial, sentados en morteros de cal adicionados, curados en diferentes ambientes, reforzados y sin reforzar.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este numeral se describen las diferentes etapas que permitieron el cumplimiento de los objetivos. En primer lugar, se presenta caracterización de los materiales: cal, arena, metacaolín, polvo de ladrillo y las unidades cerámicas. En segunda instancia, se trata la fase de diseño, preparación y caracterización de los morteros investigados. Después de esto, se muestran los procesos de elaboración y construcción de las muestras de ensayo. Posteriormente, se expone el reforzamiento de los muretes construidos para el estudio y por último, se indica la numeración de las muestras fabricadas y ensayadas.

4.1 Consulta bibliográfica

Para la redacción del marco teórico y el estado del arte, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda bibliográfica, de carácter nacional e internacional. Para esto, se utilizaron diferentes bases de datos con contenido científico. Asimismo, con la ayuda de internet se consultaron tesis universitarias, publicaciones, reportes, entre otros. El proceso de búsqueda y análisis de la bibliografía, se llevó a cabo durante toda la investigación. Gracias a esto, fue posible desarrollar las diferentes etapas del estudio.

Partiendo de la consulta bibliográfica y de la definición del alcance del proyecto, se plantearon los objetivos. De este modo, se establecieron los materiales a utilizar, las variables experimentales, número y tipo de muestras y, los diferentes ensayos a ejecutar durante la investigación.

4.2 Caracterización de los materiales

Se determinaron las propiedades de los materiales con los que se construirían los elementos de mampostería, por medio de ensayos de laboratorio, tal y como se relaciona a continuación:

4.2.1 Cal

La cal utilizada para la elaboración de los morteros, se adquirió en la ferretería La Concordia, ubicada en el centro de Bogotá. En el Anexo R se presenta la ficha técnica del material. Para determinar su composición química, una muestra se sometió al ensayo de fluorescencia de rayos X.

4.2.2 Arena

La arena que se utilizó para la fabricación de los morteros, fue arena de peña. Esta se adquirió en la ferretería la Concordia, y se ejecutaron los siguientes ensayos, para su caracterización:

- Granulometría – INV – E 213 *“Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos”*.
- Peso unitario – INV – E 217 – 13 *“Densidad Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos”*.
- Densidad y absorción – INV – E 222 - 13 *“Gravedad específica y absorción de agregados finos”*.

4.2.3 Metacaolín

El metacaolín empleado como adición en el mortero, fue suministrado por la empresa Insumos Industriales Corona; la referencia del mismo es Fortacret. Adicionalmente, para determinar la composición química de éste, se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos X.

4.2.4 Polvo de ladrillo

El polvo de ladrillo utilizado como adición en el mortero de cal, provino de bloques número 5 no estructurales. De acuerdo a la revisión bibliográfica, se utilizaron granos con tamaño menor a trescientos micrómetros. Para conseguir dicho tamaño de partículas, en primer lugar se trituraron los bloques, por medio de la trituradora del Laboratorio de

Materiales y Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería (Fotografía 4-1), obteniendo el material que se presenta en la Fotografía 4-2. Posteriormente, los pedazos de ladrillo se colocaron en la máquina de Los Ángeles (Fotografía 4-3), facilitada por el Laboratorio de Suelos de la Escuela; este proceso se hizo por lapsos de una hora, hasta obtener polvo, tal y como se indica en la Fotografía 4-4. Después de esto, se procedió a tamizar los granos, utilizando tamices de trescientas micras, que en nomenclatura del sistema inglés corresponde al número 50. Dicho proceso se ejecutó mediante el uso de una tamizadora eléctrica (Fotografía 4-5), obteniendo finalmente el polvo que se utilizó para la presente investigación.



Fotografía 4-1 Trituración de bloques

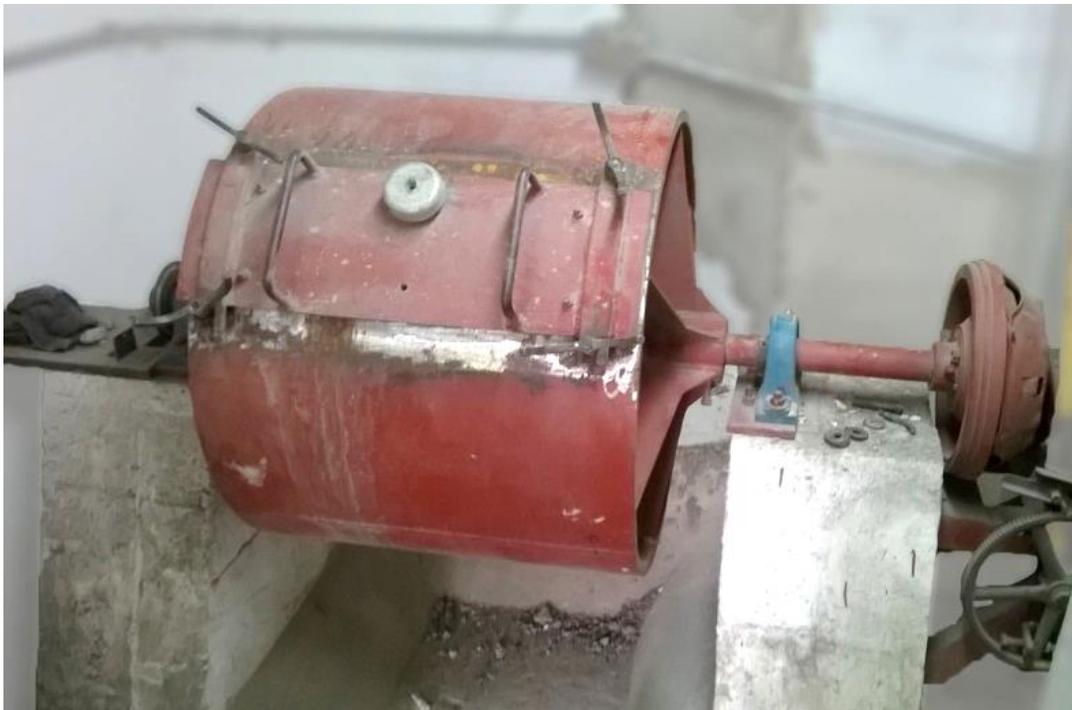
Fuente: El autor

- 88 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas
-



Fotografía 4-2 Bloque triturado

Fuente: El autor



Fotografía 4-3 Máquina de Los Ángeles

Fuente: El autor



Fotografía 4-4 Polvo de ladrillos antes de tamizar

Fuente: El autor



Fotografía 4-5 Tamizado del polvo de ladrillo

Fuente: El autor



Fotografía 4-6 Polvo de ladrillo para la investigación

Fuente: El autor

En el polvo de ladrillo, se realizaron pruebas de fluorescencia de rayos X, con el objetivo de obtener su composición química. Adicional a esto, se determinó la granulometría del material, utilizando tamices con tamaños inferiores a trescientas micras.

4.2.5 Ladrillos patrimoniales

En un depósito de demolición, ubicado en el barrio Las Cruces, en el centro de Bogotá, se adquirieron unidades de mampostería patrimonial, de tipo rosado y recocido. Para la caracterización de los ladrillos, se realizaron las siguientes pruebas:

- Absorción – NTC 4017 *“Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla”*.
- Resistencia a compresión – NTC 4017.
- Módulo de rotura – NTC 4017.

En la Tabla 4-1, se presenta un resumen de los ensayos ejecutados en los ladrillos patrimoniales.

Tabla 4-1 Resumen de ensayos en unidades de mampostería patrimonial

Ensayo	Tipo de ladrillo	Cantidad	Total
Absorción	2	5	10
Resistencia a compresión	2	5	10
Módulo de rotura	2	5	10

Fuente: El autor

4.3 Diseño, preparación y caracterización de morteros

Con base en la revisión bibliográfica, se seleccionaron las proporciones de materiales indicadas en la Tabla 4-2. Del mismo modo, la elaboración de las mezclas se hizo de acuerdo al protocolo ECI-PLME-042, elaborado por el Laboratorio de Estructuras y Materiales (ver Anexo T). Cabe anotar que no fue necesario apagar la cal, debido a que ya se encontraba apagada, y fue comprobado por Torres et al. (2016).

Tabla 4-2 Proporciones seleccionadas para los morteros

Mortero	Denominación	Proporción
Cal : arena	MCA	1:3
Cal : arena : metacaolín	MMK	1:3:0.2
Cal : arena : polvo de ladrillo	MPL	1:3:1

Fuente: El autor

De otro lado, para determinar la cantidad de agua requerida por mezcla, se buscó obtener una fluidez del 100%. Sin embargo, para determinar dicha propiedad en morteros de cal, no existe una normativa nacional, por lo que se utilizó el procedimiento descrito en la norma NTC 111. En la Fotografía 4-7 se presenta con detalle el procedimiento del ensayo.



a)



b)



c)



d)

Fotografía 4-7 Fluidéz en morteros de cal **a)** Llenado del molde metálico **b)** Apisonado **c)** Enrasado superior **d)** Retiro del molde

Fuente: El autor



e)



f)

Fotografía 4-8 (Continuación) e) Mortero después de las caídas de la mesa f) Medida de diámetros

Fuente: El autor

Por medio de ensayo y error, se determinaron las cantidades de agua necesarias para obtener una fluidez del 100%. En la Tabla 4-3 se presentan las cantidades de materiales, y las relaciones agua cal de los morteros.

Tabla 4-3 Dosificación de mezclas de mortero

Mortero	Cal (g)	Arena (g)	Metacaolín (g)	Polvo de ladrillo (g)	Agua (g)	Fluidez (%)	Agua Cal
MCA	200	600	-	-	180	101	0.90
MMK	200	600	40	-	210	97	1.05
MPL	200	600	-	200	252	100	1.26

Fuente: El autor

Una vez conocidas las cantidades de agua requeridas en cada mezcla, se fabricaron cubos de 5 cm de arista, sobre los que se ejecutaron pruebas de compresión de acuerdo

al procedimiento descrito en la norma NTC 220, en tres cubos para cada una de las siguientes edades: siete, veintiocho, sesenta y noventa días.

Por otro lado, se elaboraron tres cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, por cada tipo de mortero. Sobre estos se midió la profundidad de carbonatación a cinco y siete días de carbonatados en la cámara, con el objetivo de determinar la constante de carbonatación de las mezclas.

En la Tabla 4-4 se presenta un resumen de los ensayos ejecutados en los morteros fabricados.

Tabla 4-4 Resumen de ensayos en morteros

Ensayo	Tipo de mortero	Edad	Curado	Cantidad	Total
Resistencia a compresión	3	4	2	3	72
Profundidad de carbonatación	3	2*	1	3	9

*La profundidad de carbonatación se determinó en dos edades, en las mismas muestras.

Fuente: El autor

4.4 Elaboración y construcción de las muestras de ensayo

4.4.1 Cubos de mortero

La fabricación de las mezclas y la elaboración de los cubos de 5 cm de arista, se hizo tomando como referencia la norma NTC 220. El proceso consistió en pesar los materiales utilizando las proporciones definidas. Acto seguido, se mezclaron utilizando una mezcladora mecánica eléctrica, de acuerdo al protocolo ECI-PLME-042 (ver Anexo T). Posteriormente, se agregó la mezcla en los moldes previamente engrasados; este paso se hizo en dos capas de 2.5 cm y se apisonaron 32 veces. Por último, se enrasó la superficie de los cubos. En la Fotografía 4-8 se presentan algunas de las etapas de la fabricación de los ejemplares.

Una vez preparadas las muestras, se colocaron en los moldes por un período de tres días, en una cámara de humedad y temperatura, bajo las siguientes condiciones controladas: temperatura de 25 ± 2 °C y humedad relativa de $55 \pm 5\%$. Después de esto, se retiraron las muestras de los moldes (ver Fotografía 4-9) y se procedió al curado de estas. Para esto, se utilizaron dos ambientes: el primero consistió en la cámara de humedad y temperatura (ver Fotografía 4-10), mientras que el segundo correspondió a una cámara de carbonatación (ver Fotografía 4-11), con las siguientes condiciones controladas: temperatura de 23 °C, humedad relativa de 65% y concentración de CO₂ del 5%. Este último proceso, se hizo teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y, considerando que los morteros de cal adquieren resistencia con la presencia de CO₂. Por ende, al utilizar la cámara de carbonatación, se aceleró el proceso de envejecimiento y de ganancia de resistencia de las mezclas.

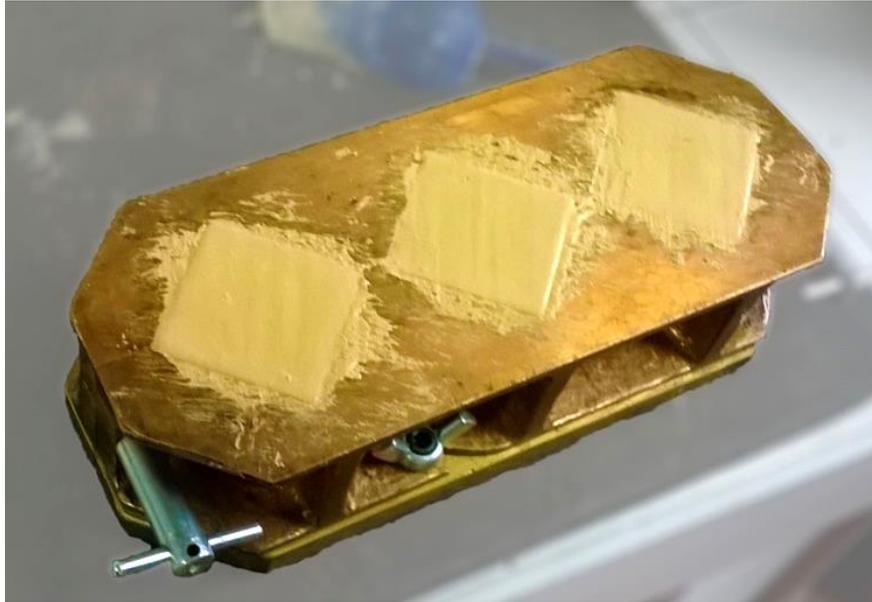


a)

b)

Fotografía 4-8 Fabricación de cubos de mortero **a)** Mezcla mecánica del mortero **b)**
Llenado de los moldes con el mortero

Fuente: El autor



c)

Fotografía 4-8 (Continuación) c) Moldes llenos

Fuente: El autor



Fotografía 4-9 Desmolde de cubos de mortero

Fuente: El autor



Fotografía 4-10 Curado de cubos en cámara de humedad y temperatura

Fuente: El autor



Fotografía 4-11 Curado de cubos en cámara de carbonatación

Fuente: El autor

4.4.2 Cilindros de mortero

Como se mencionó previamente, para evaluar la profundidad de carbonatación de los morteros, se fabricaron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Para esto, se siguió la metodología descrita en el apéndice A.7 de la norma NTC 3546, con algunas modificaciones, debido a que dicho documento no contempla cilindros con las

dimensiones descritas. El proceso de fabricación consistió en pesar los materiales para tener las relaciones definidas. Después de esto se mezcló manualmente por un período aproximado de 10 minutos (Fotografía 4-12), considerando el procedimiento del protocolo ECI-PLME-042. Teniendo una mezcla más homogénea, se llenaron los moldes cilíndricos en tres capas, las cuales se apisonaron 20 veces, cada una, por medio de una barra lisa, con punta redondeada, de tres octavos de pulgada (ver Fotografía 4-13). Una vez llenado el molde, se procedió a compactar el contenido y, por medio de golpes suaves, se extrajo el aire atrapado en la mezcla, con la ayuda de un martillo de caucho (ver Fotografía 4-14). Finalmente, se uniformizó la superficie expuesta del elemento con la ayuda de un palustre.

Después de llenar los moldes, se procedió a llevarlos a la cámara de humedad y temperatura, por tres días. Ulteriormente, se desmoldaron los cilindros y se les aplicó un epóxico para impermeabilizar las caras superior e inferior (ver Fotografía 4-16), con la finalidad de impedir la penetración de CO₂ por dichas zonas. Dicho compuesto se dejó secar hasta el día siguiente, momento en el que se llevaron los cilindros a la cámara de carbonatación hasta la fecha de ensayo.



Fotografía 4-12 Mezcla manual del mortero

Fuente: El autor



Fotografía 4-13 Apisonado del mortero

Fuente: El autor



Fotografía 4-14 Extracción de aire en el mortero

Fuente: El autor



Fotografía 4-15 Almacenamiento de moldes de cilindros en cámara de humedad y temperatura

Fuente: El autor



Fotografía 4-16 Impermeabilización de caras de cilindros de mortero

Fuente: El autor

4.4.3 Muretes de mampostería

Para la investigación se construyeron tres tipos de muestras de mampostería. La primera clase, correspondió a muretes de unidad y media de mampostería, con dimensiones nominales largo, alto y ancho de 39 x 32.5 x 12 cm (ver Figura 4-1). Adicionalmente, la segunda categoría de muretes, consistió en muretes “medianos” con dimensiones nominales largo, alto y ancho de 52.5 x 41 x 25 cm y, configuración tipo tizón (ver Figura 4-2). El tercer tipo de muestras, fueron muretes “grandes”, cuyas dimensiones nominales largo, ancho y alto, fueron de 106.5 x 109 x 25 cm, también con entramado tipo tizón (ver Figura 4-3). Para las juntas de los muretes, se utilizó el mortero de cal y arena, adicionado con metacaolín, con proporciones cal : arena : metacaolín de 1:3:0.2. Adicionalmente, también se empleó mortero de cal y arena, con una dosificación cal : arena de 1:3, en muretes de unidad y media. Todas las muestras, se construyeron con un 20% de unidades recocidas y el porcentaje restante, con rosadas.

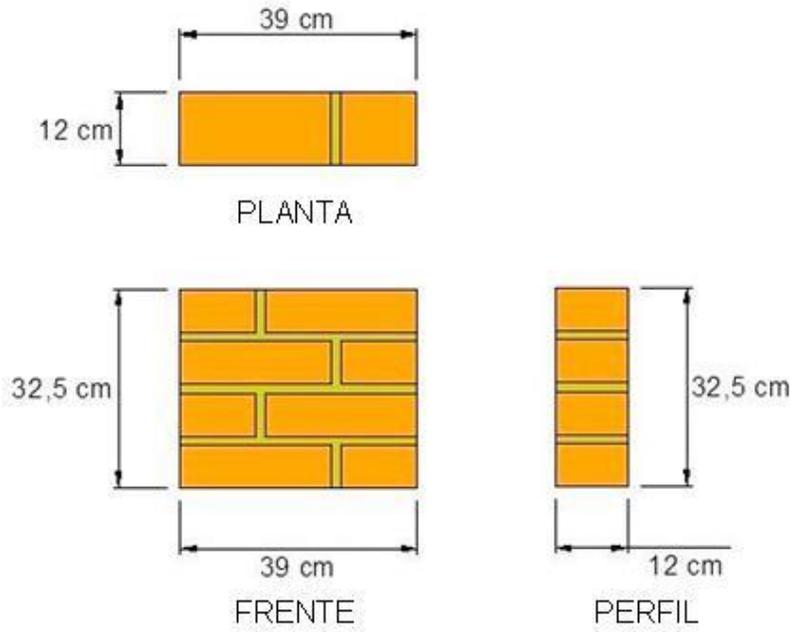


Figura 4-1 Dimensiones murete de unidad y media

Fuente: El autor

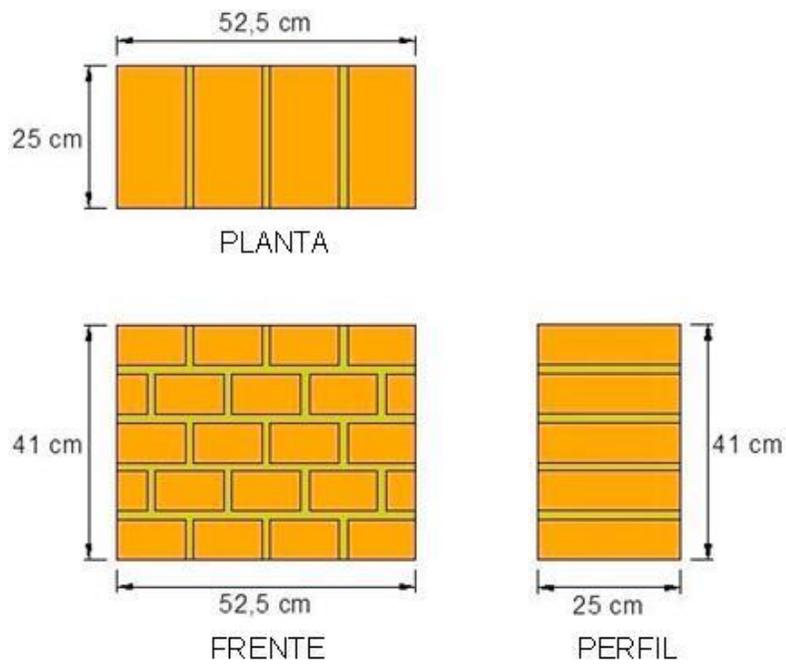


Figura 4-2 Dimensiones murete mediano

Fuente: El autor

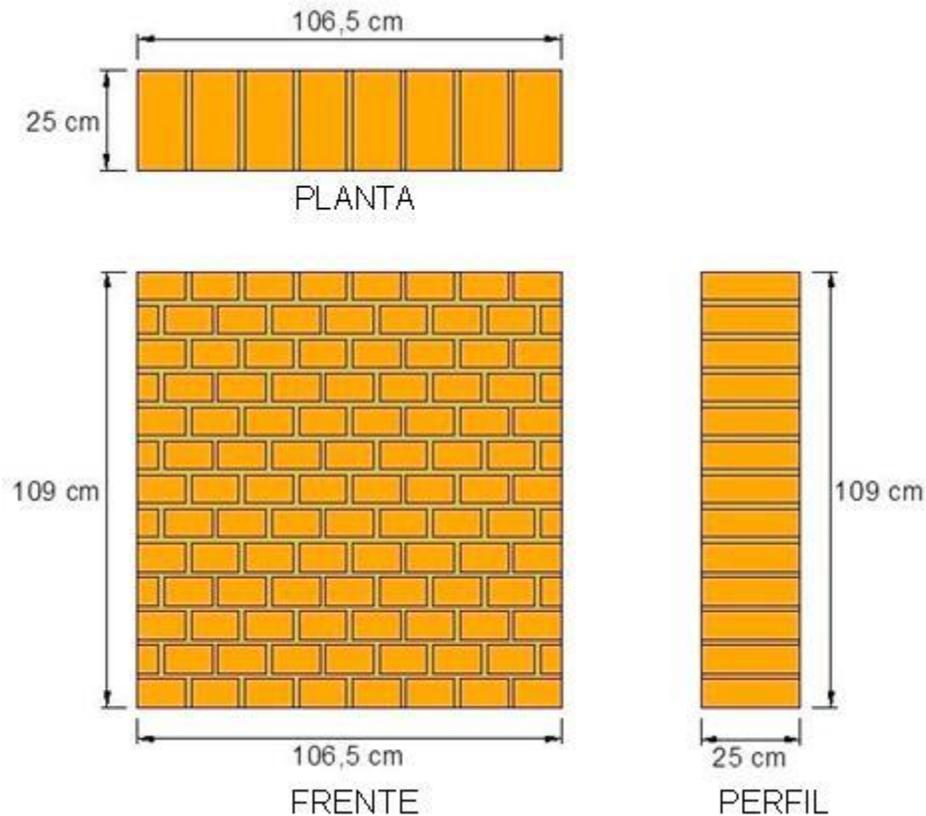
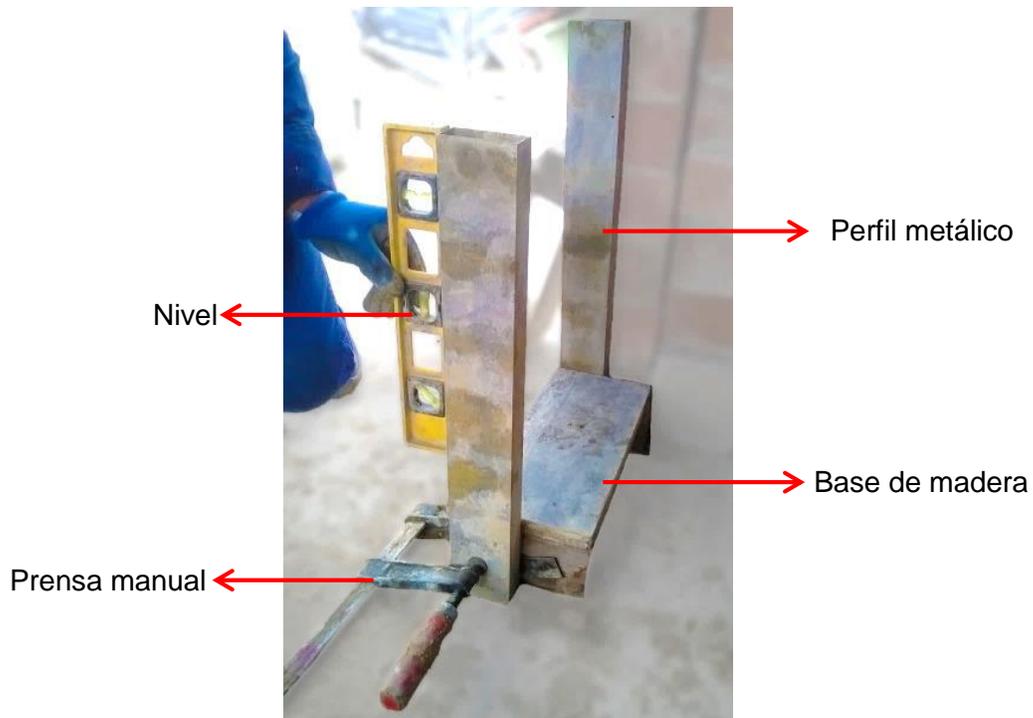


Figura 4-3 Dimensiones murete grande

Fuente: El autor

Por otro lado, el proceso constructivo de los muretes de unidad y media y, el de los medianos, fue el mismo. En primera instancia, fue necesario construir unas bases de madera, compuestas por un par de repisas y una tabla horizontal, previamente cortadas, de acuerdo a las dimensiones de los especímenes. Posteriormente, se colocaron unos perfiles metálicos a los lados de la base, ajustando su verticalidad con la ayuda de un nivel y, ajustándolos en la base por medio de unas prensas manuales, con el objetivo de garantizar la verticalidad de los ejemplares. En la Fotografía 4-17 se muestra la base de las muestras. Adicional a esto, fue necesario cortar algunos ladrillos por la mitad, por lo que se utilizó una cortadora eléctrica con refrigeración (ver Fotografía 4-18).



Fotografía 4-17 Base de madera para construir muretes

Fuente: El autor



Fotografía 4-18 Corte de unidades cerámicas

Fuente: El autor

Una vez construidas las bases de los elementos y cortados los ladrillos, se procedió al pesaje de los materiales, utilizando una báscula de reloj (ver Fotografía 4-19), de acuerdo

104 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

al diseño de mezcla establecido. Seguido a esto, se mezclaron los materiales de forma manual hasta homogeneizarlos (ver Fotografía 4-20), siguiendo el protocolo ECI-PLME-042. Posteriormente, comenzó a adicionarse agua y se continuó el mezclado (ver Fotografía 4-21), hasta obtener una mezcla homogénea.



Fotografía 4-19 Pesaje de la arena

Fuente: El autor



Fotografía 4-20 Mezcla de los materiales

Fuente: El autor



Fotografía 4-21 Mezcla manual de mortero

Fuente: El autor

Ya teniendo el mortero, se colocó una capa inicial en la base de madera, y se comenzaron a asentar las unidades de mampostería (ver Fotografía 4-22 y Fotografía 4-23) hasta completar las hiladas de la muestra (ver Fotografía 4-24). Cabe mencionar, que los ladrillos se sumergieron en agua por media hora, para evitar pérdidas de agua en la mezcla. Finalizada la construcción de los muretes, se protegieron bajo una carpa, con el objetivo de evitar daños por la lluvia.



Fotografía 4-22 Inicio construcción murete de unidad y media

Fuente: **El autor**



Fotografía 4-23 Inicio construcción murete mediano

Fuente: **El autor**



Fotografía 4-24 Finalización construcción murete de unidad y media

Fuente: **El autor**

Por otra parte, para la elaboración de los muretes de mayor tamaño, fue necesario construir una base diferente, compuesta por un encofrado en madera, en el que se ubicaron cinco cilindros de concreto, de 15 cm de diámetro y 30 cm de largo (ver Fotografía 4-25). Después de esto, se colocó arena en el interior del armado y con un palustre se niveló la superficie (ver Fotografía 4-26 y Fotografía 4-27), verificando la horizontalidad de esta. De igual manera, como en el caso de las otras muestras, también se colocaron perfiles metálicos verticales, para garantizar la verticalidad de las muestras. También fue necesario cortar algunas unidades cerámicas por la mitad por cuestiones constructivas.



Fotografía 4-25 Base de muretes grandes

Fuente: El autor



Fotografía 4-26 Llenado de la base del murete grande con arena

Fuente: El autor



Fotografía 4-27 Nivelación de la base de murete grande

Fuente: El autor

Teniendo las bases de los muretes, se procedió al pesaje de los materiales y a la elaboración de la mezcla. Para esto, se utilizó una mezcladora mecánica (ver Fotografía 4-28), debido a que las cantidades de material dificultaban el proceso manual y, para garantizar una mezcla homogénea. El tiempo de mezclado fue de ocho minutos en promedio.



Fotografía 4-28 Mezclado mecánico de mortero

Fuente: El autor

Una vez fabricado el mortero, se colocó una capa inicial sobre la base de arena, y comenzaron a asentarse los ladrillos (ver Fotografía 4-29), hasta completar las hiladas del murete. Después de alzado el elemento, se procedió a retirar el encofrado de madera, dejando la muestra sobre los cilindros de concreto y la arena (ver Fotografía 4-30).



Fotografía 4-29 Construcción murete grande

Fuente: El autor



Fotografía 4-30 Murete grande

Fuente: El autor

En total se construyeron veinte muretes de unidad y media, de la siguiente manera: ocho con mortero de cal y arena, y los restantes con mortero adicionado con metacaolín. De igual manera, se fabricaron nueve muretes medianos y nueve grandes, con mortero adicionado con metacaolín.

4.5 Reforzamiento de muretes de mampostería

Para el reforzamiento de los muretes, se utilizaron dos alternativas: la primera consistió en colocar una malla electrosoldada, embebida en mortero de cal y arena, adicionado con metacaolín. Para la segunda propuesta, se colocaron barras de FRP en las juntas de la mampostería. Cabe resaltar, que el reforzamiento de los muretes se realizó únicamente por una cara, considerando que, en una estructura real, por lo general la cara sin reforzar, no podrá ser alterada para respetar su valor arquitectónico y patrimonial.

4.5.1 Caracterización de malla electrosoldada

La malla electrosoldada calibre 0.5 cm, de 15 x 15 cm, utilizada para reforzar la mampostería, se adquirió en la Ferretería Mallas y Angeos. Para su caracterización, se realizaron pruebas de tensión y corte en la soldadura, teniendo en cuenta las especificaciones de la norma NTC 5806 *“Alambre de acero liso y grafilado y mallas electrosoldadas para refuerzo de concreto”*.

4.5.2 Reforzamiento con malla electrosoldada

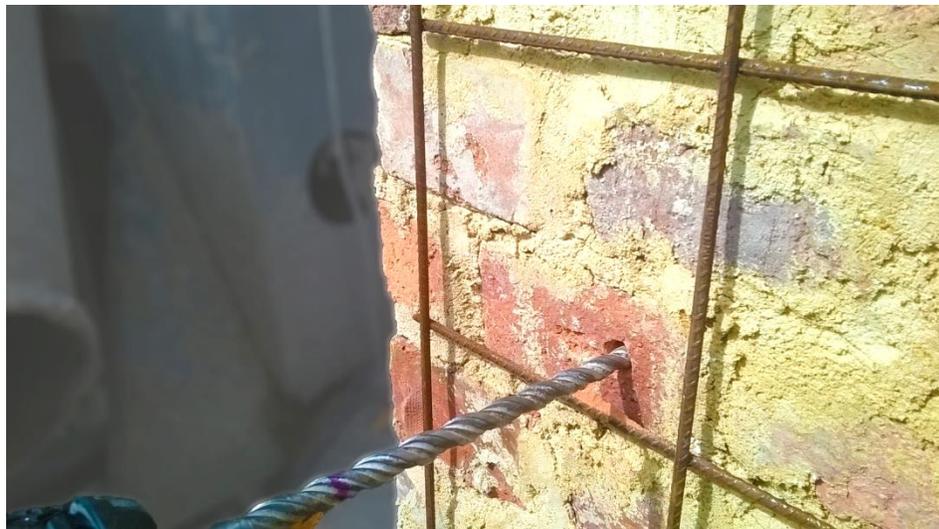
Para anclar la malla electrosoldada en los muretes construidos, se utilizaron grafiles de acero de 0.5 cm de diámetro, los cuales se doblaron en forma de “U”, tal y como se observa en la Fotografía 4-31.



Fotografía 4-31 Grafiles utilizados para el anclaje de la malla electrosoldada

Fuente: El autor

Adicional a lo anterior, para la instalación de los anclajes, fue necesario perforar las unidades cerámicas utilizando un taladro (ver Fotografía 4-32). Posteriormente, se colocó la malla a una distancia promedio de 1.5 cm, con respecto a la cara del muro y se amarró con los grafiles. Después de esto, las perforaciones se inyectaron con epóxico, de la empresa Hilti, tal y como puede apreciarse en la Fotografía 4-33.



Fotografía 4-32 Perforación en mampostería para instalación de anclajes

Fuente: El autor

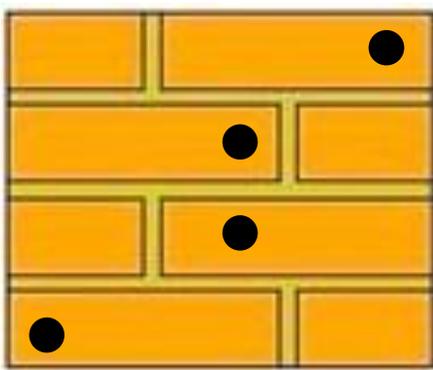


Fotografía 4-33 Inyección de epóxico en los anclajes del refuerzo

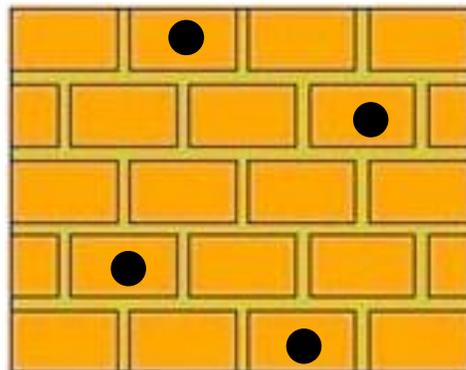
Fuente: El autor

Una vez anclada la malla electrosoldada, se procedió a construir una formaleta para fundir el mortero para embeber el refuerzo; éste se proyectó de un espesor de 3 cm, teniendo en cuenta lo planteado en otros estudios. Asimismo, la dosificación de la mezcla fue igual a la de las juntas de los muretes, es decir proporciones cal:arena:metacaolín de 1:3:0.2. El curado del mortero fue de 30 días, antes de la ejecución de los ensayos destructivos en la mampostería.

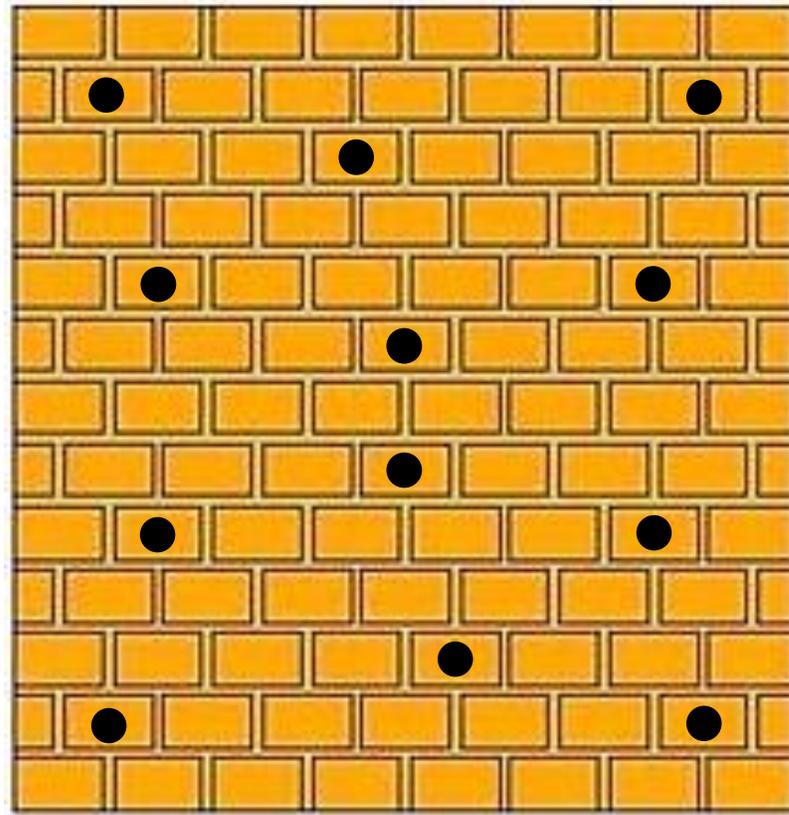
Por último, en la Figura 4-4 se indica la ubicación de los anclajes en los muretes.



a)



b)



c)

Figura 4-4 Ubicación de anclajes para reforzamiento con malla electrosoldada **a)** muretes de unidad y media **b)** muretes medianos **c)** muretes grandes

4.5.3 Caracterización de barras de GFRP

Para esta metodología de reforzamiento, se emplearon barras de fibra de vidrio (GFRP), donadas por la empresa Armastek, con diámetro nominal de 0.8 cm, teniendo en cuenta que el espesor de las juntas se proyectó de 1.5 cm. Para evaluar las propiedades mecánicas, se realizaron pruebas de tensión, teniendo en cuenta las especificaciones de la norma ASTM D7205 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Beams*”.

4.5.4 Reforzamiento con barras de FRP

Para la instalación de las barras fue necesario ranurar las juntas de mortero, con la ayuda de una pulidora (ver Fotografía 4-34), a una profundidad aproximada de 1 cm. Después de esto, se procedió a limpiar la zona intervenida, y se inyectó una primera capa de resina epóxica (Sikadur 30), de la empresa Sika Colombia. Posteriormente, se colocaron las barras sobre la resina y se terminaron de rellenar las juntas. Las muestras se ensayaron después de 30 días de haber sido reforzadas.



Fotografía 4-34 Corte de las juntas de mampostería

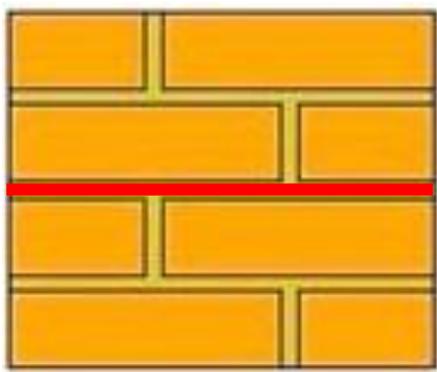
Fuente: El autor



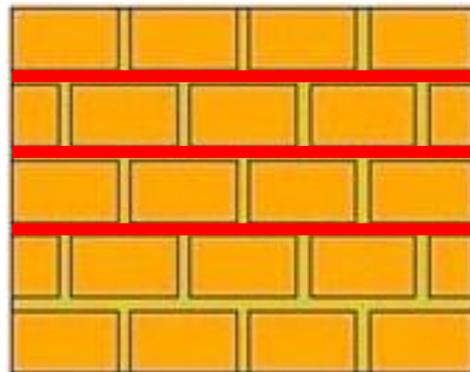
Fotografía 4-35 Ubicación de las barras de FRP en las juntas de mampostería

Fuente: El autor

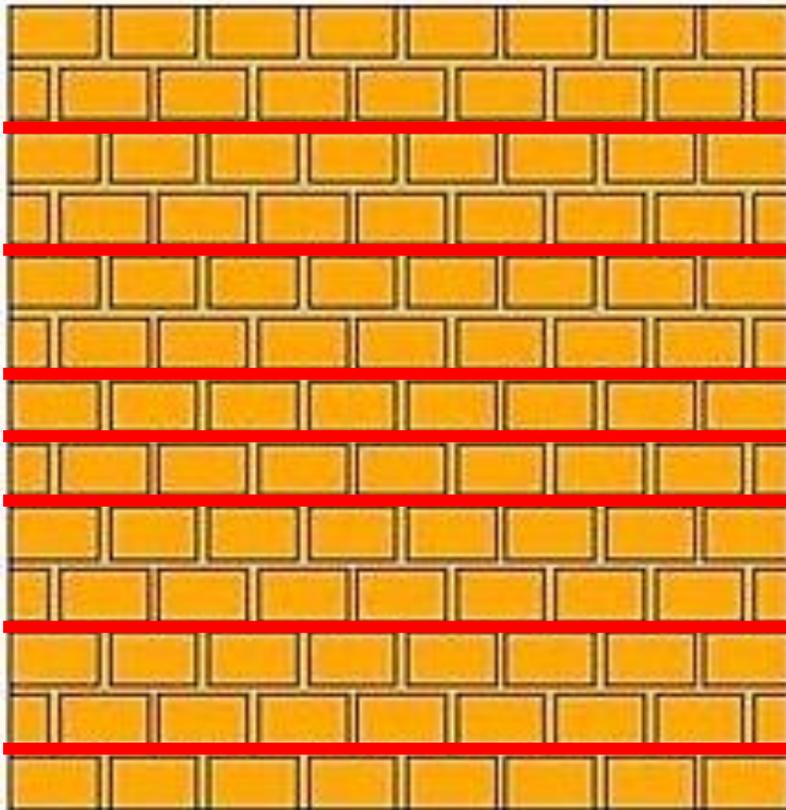
Por otro lado, en la Figura 4-5 se indican las juntas que se reforzaron con las barras de GFRP.



a)



b)



c)

Figura 4-5 Ubicación de barras de GFRP **a)** muretes de unidad y media **b)** muretes medianos **c)** muretes grandes

Por último, en la Tabla 4-5 se presentan las cuantías de refuerzo horizontal (ρ_n) utilizadas en los diferentes tipos de muretes.

Tabla 4-5 Cuantía de refuerzo horizontal en muretes

Tipo murete	Área mampostería (cm ²)	Área refuerzo (cm ²)	Cuantía (ρ_n)
Unidad y media	390	0.5	0.001282
Mediano	1025	1.5	0.001463
Grande	2725	3.5	0.001284

Fuente: El autor

4.6 Ensayos en muretes de mampostería

Una vez construidas las muestras de mampostería, se dejaron curar en condiciones ambientales, por un tiempo de 175 días. Pasado dicho período, se ejecutaron los siguientes ensayos:

- Resistencia a compresión – NTC 3495 “*Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de muretes de mampostería*”.
- Módulo elástico – NSR 10 numeral D.5.2.1.2.
- Compresión diagonal – ASTM E519 “*Standard test method for diagonal tensión (shear) in masonry assemblages*”.

En la Tabla 4-6 se presenta un resumen de los ensayos ejecutados en los muretes construidos.

Tabla 4-6 Resumen de ensayos en unidades de mampostería patrimonial

Ensayo	Tipo de murete	Cantidad	Total
Resistencia a compresión	2	29	29
Módulo elástico	2	29	29
Compresión diagonal	1	9	9

Fuente: El autor

4.7 Identificación de las muestras de ensayo

4.7.1 Morteros

Como se indicó en el numeral 4.3, se fabricaron tres tipos de mortero, identificados de la siguiente forma: mortero de cal y arena (MCA), mortero de cal y arena, adicionado con metacaolín (MMK). Por último, se elaboró un mortero de cal y arena, adicionado con polvo de ladrillo (MPL).

4.7.2 Unidades de mampostería

Como se mencionó en el numeral 4.2.5, para el estudio se emplearon dos tipos de ladrillo: unidades rosadas (URS) y recocidas (URC).

4.7.3 Muretes

Cada uno de los muretes se identificó por medio de un código que dependía del tamaño de la muestra (numeral 4.4.3) y el tipo de reforzamiento utilizado. En primer lugar, los muretes de unidad y media se identificaron con las siglas 1.5U, mientras que los “medianos” como MD, y los “grandes” como GD. Adicional a lo anterior, a los ejemplares no reforzados se les incluyeron siglas NR, mientras que a los elementos reforzados con malla electrosoldada con ME y, a los especímenes reforzados con barras de FRP con BFRP. A continuación, se presenta un ejemplo de la identificación de una de las muestras:

M3 - MD - ME

Murete 3 Murete mediano Muestra reforzada con malla electrosoldada

5.RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos planteados en la metodología experimental. En primer lugar, se trata la caracterización de los materiales por separado: cal, arena, metacaolín, polvo de ladrillo y ladrillos patrimoniales. Posteriormente, se discuten los resultados encontrados en las propiedades evaluadas de los diferentes tipos de mortero y por último, se exponen las propiedades mecánicas evaluadas en las muestras de mampostería.

5.1 Caracterización de la cal

Torres et al. (2016) caracterizaron cal de la ferretería La Concordia. Para esto, se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X, llevada a cabo en el laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (ver Anexo A), aprovechando el convenio existente entre dicha institución y la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Para la caracterización, se realizó un análisis semicuantitativo con el software SemiQ. De este modo se detectaron los elementos presentes en la muestra, excluyendo hidrógeno (H), litio (Li), berilio (Be), boro (B), nitrógeno (N), oxígeno (O) y los elementos transuránicos. En la Tabla 5-1 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización.

Tabla 5-1 Composición química de la cal

Elemento y/o compuesto	% en peso
CaO	86.834
SiO ₂	6.666
Al ₂ O ₃	2.355
Fe ₂ O ₃	1.876
MgO	0.877

Tabla 5-1 (Continuación)

Elemento y/o compuesto	% en peso
SO ₃	0.600
K ₂ O	0.240
TiO ₂	0.215
P ₂ O ₅	0.156
SrO	0.086
MnO	0.057
ZnO	0.025
Cl*	0.012

*Valor informativo

Fuente: Elaboración propia con base al informe XRF-148-16 del laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional, sede Bogotá (Ver Anexo A)

Se observa que la cal tiene alto contenido de óxido de calcio (CaO), el cual al hidratarse se transforma en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), que a su vez se precipitará en forma de carbonato de calcio (CaCO₃), durante el proceso de carbonatación. De igual forma, se aprecia que el material tiene cierto contenido de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃), compuestos que intervienen en la formación de silicatos cálcicos hidratados (CSH) y aluminato cálcico hidratado (CAH), al mezclarse la cal con agua.

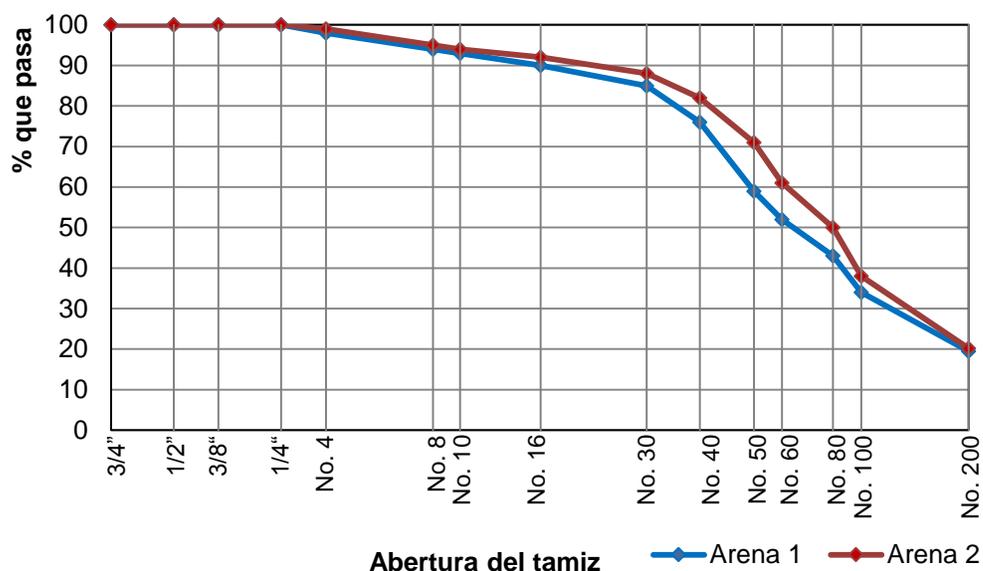
5.2 Caracterización de la arena

Torres et al. (2016) también hicieron uso de arena de peña, adquirida en la ferretería La Concordia. Por ende, para la caracterización de la arena, se tomaron como referencia los resultados reportados por los autores, de acuerdo al informe del laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ver Anexo B). En la Tabla 5-2 se presenta la granulometría de la arena utilizada, mientras que en la Gráfica 5-1 se muestran las curvas granulométricas. Adicional a lo anterior, en la Tabla 5-3 se indican los resultados de los siguientes ensayos: peso unitario, densidad relativa, densidad y absorción.

Tabla 5-2 Granulometría de la arena

Tamiz (pulg.)	Ensayo 1	Ensayo 2
	% que pasa	% que pasa
3/4	100	100
1/2	100	100
3/8	100	100
1/4	100	100
No. 4	98	99
No. 8	94	95
No. 10	93	94
No. 16	90	92
No. 30	85	88
No. 40	76	82
No. 50	59	71
No. 60	52	61
No. 80	43	50
No. 100	34	38
No. 200	19,5	20,2
Fondo	0	0

Fuente: Elaboración propia con base al informe IG-024-16 del laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y el estudio de Torres et al. (2016) (Ver Anexo B)



Gráfica 5-1 Curvas granulométricas de la arena

Tabla 5-3 Propiedades de la arena

PROPIEDAD	Unidad	Arena 1	Arena 2
PESO UNITARIO			
Densidad Bulk suelta por paladas	kg/m ³	1470	1410
Densidad Bulk compactada por apisonado	kg/m ³	1610	1580
DENSIDAD RELATIVA			
Densidad relativa secada al horno	g/cm ³	2.54	2.56
Densidad relativa en condición SSS	g/cm ³	2.59	2.60
Densidad relativa aparente	g/cm ³	2.68	2.66
DENSIDAD			
Densidad en condición seca al horno	kg/m ³	2540	2560
Densidad en condición SSS	kg/m ³	2590	2590
Densidad aparente	kg/m ³	2680	2650
ABSORCIÓN			
Absorción	%	2.1	1.4

Fuente: Elaboración propia con base al informe IG-024-16 del laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y el estudio de Torres et al. (2016) (Ver Anexo B)

5.3 Caracterización del metacaolín

Para determinar la composición química del metacaolín, se utilizó la técnica de difracción de rayos X. Dicho ensayo también se realizó en el laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (ver Anexo C). En la Tabla 5-4 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5-4 Composición química del metacaolín

Elemento y/o compuesto	% en peso
SiO ₂	58.04
Al ₂ O ₃	38.14
Fe ₂ O ₃	1.36
TiO ₂	1.23
K ₂ O	0.59
MgO	0.2
CaO	0.14
Na ₂ O	0.07
SO ₃	0.05
Ba	0.05
P ₂ O ₅	0.04
Zr	0.04
V*	176 ppm
MnO*	155 ppm
Cr*	118 ppm
Ga*	56 ppm
Cu*	45 ppm
Zn*	36 ppm
Rb*	24 ppm
Sr*	20 ppm
Nb*	16 ppm
Y*	15 ppm

*Valor informativo

Fuente: Elaboración propia con base al informe XRF-024-17 del laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional, sede Bogotá (Ver Anexo C)

Básicamente, se aprecia que el metacaolín utilizado, se encuentra compuesto en su mayoría por sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃), en un orden del 96.18%. Como se mencionó previamente, al mezclarse con cal y agua, estos intervienen en la formación de CSH,

CAH y alumino-silicatos hidratados. La composición química obtenida resultó similar a la obtenida por diferentes autores, entre los que se encuentran Aggelakopoulou et al. (2011), Velosa et al. (2009) y Vejmelková et al. (2012).

5.4 Caracterización del polvo de ladrillo

La composición del polvo de ladrillo utilizado, se obtuvo utilizando la técnica de fluorescencia de rayos X. Al igual que con la cal y el metacaolín, el ensayo se ejecutó en el laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (ver Anexo D). En la Tabla 5-5 se presentan los resultados registrados en la prueba.

Tabla 5-5 Composición química del polvo de ladrillo

Elemento y/o compuesto	% en peso
SiO ₂	67.27
Al ₂ O ₃	23.13
Fe ₂ O ₃	5.56
K ₂ O	1.59
TiO ₂	1.08
MgO	0.43
Na ₂ O	0.35
CaO	0.17
Ba	0.14
P ₂ O ₅	0.08
SO ₃	0.06
V	0.03
Zr	0.03
Cr	0.02
Zn	0.02
Sr	0.02
Cl	0.01
MnO	0.01
Rb*	96 ppm
Pb*	84 ppm
Y*	32 ppm
Nb*	16 ppm

*Valor informativo

Fuente: Elaboración propia con base al informe XRF-228-17 del laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional, sede Bogotá (Ver Anexo D)

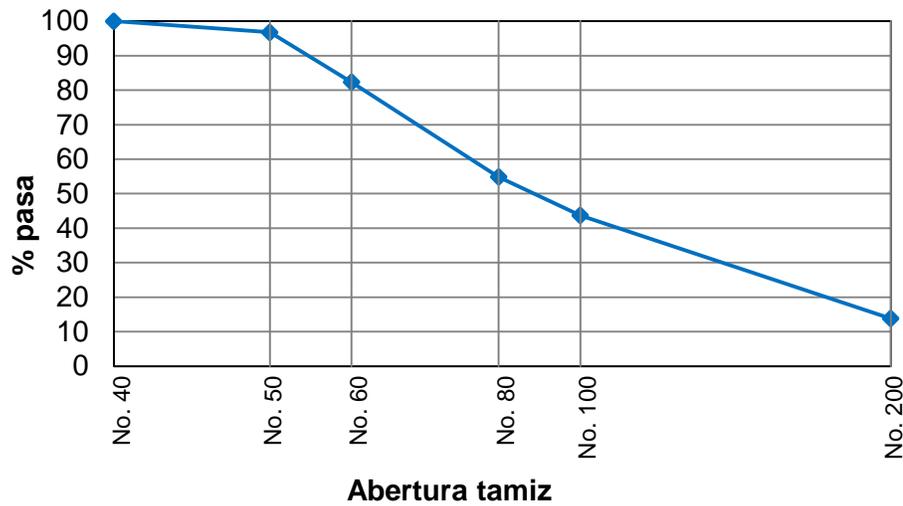
Se observa que el polvo utilizado, en mayor grado se encuentra compuesto por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), del orden del 90.40%. Estos compuestos al mezclarse con la cal y el agua, intervendrán en la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio.

Por otro lado, para determinar la distribución del tamaño de los granos del polvo de ladrillo, se realizó un análisis granulométrico con los siguientes tamices: No. 40 (0.425 mm), No. 50 (0.3 mm), No. 60 (0.25 mm), No. 80 (0.18 mm), No. 100 (0.15 mm) y No. 200 (0.075 mm). En la Tabla 5-6 se presenta el análisis granulométrico y en la Gráfica 5-2 la curva granulométrica de la muestra.

Tabla 5-6 Análisis granulométrico del polvo de ladrillo

Tamiz		Masa retenida (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
mm	pulg				
0.425	No. 40	0	0	0	100
0.3	No. 50	28.22	3	3	97
0.25	No. 60	126.37	14	18	82
0.18	No. 80	240.62	27	45	55
0.15	No. 100	97.66	11	56	44
0.075	No. 200	261.85	30	86	14
Fondo		121.00	14	100	0
		875.72	100		

Fuente: El autor



Gráfica 5-2 Curva granulométrica del polvo de ladrillo

Fuente: El autor

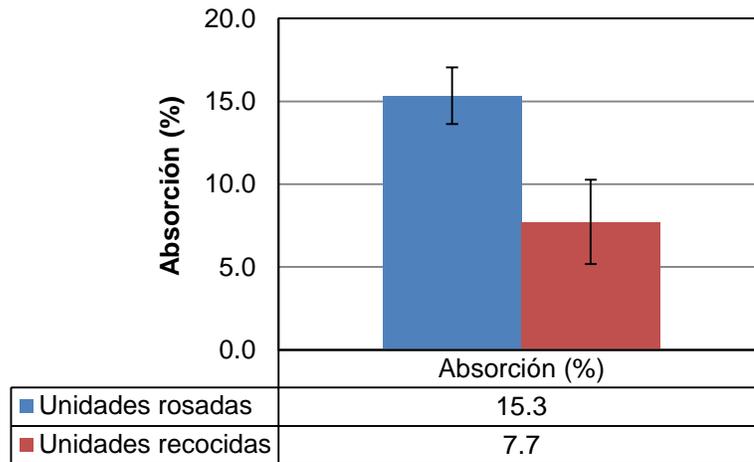
5.5 Caracterización de las unidades cerámicas patrimoniales

5.5.1 Absorción en unidades cerámicas

La absorción de las unidades cerámicas se relaciona con la porosidad, propiedad que se encuentra ligada a la composición de la materia prima y el grado de cocción durante el proceso de fabricación (Molano & Torres, 2017). El ensayo se realizó en cinco unidades rosadas y en cinco recocidas, tomando como referencia el procedimiento descrito en la norma NTC 4017 *“Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla”*.

En primer lugar, se secaron las muestras en un horno a una temperatura de 110 °C, por un período de veinticuatro horas, hasta tener una masa constante; de este modo, se registró el peso seco. Posteriormente, se dejaron enfriar por cuatro horas y se sumergieron en un tanque de agua, por veinticuatro horas. Después de esto, se sacaron los especímenes y se secaron con un paño para retirar los excesos de líquido. Acto seguido se pesaron las probetas, obteniendo el peso saturado.

En las unidades rosadas, se obtuvo una absorción promedio de 15.3%, mientras que en las recocidas de 7.7%, con dispersiones de 11.1% y 33%, respectivamente. En la Gráfica 5-3 se presentan los promedios obtenidos con las desviaciones estándar. De igual manera, los registros resultaron similares a los obtenidos por Torres et al. (2016).



Gráfica 5-3 Absorción en unidades de mampostería

Fuente: El autor

Con los resultados obtenidos, se verifica que las unidades que tuvieron un mayor grado de cocción, en este caso las recocidas, presentaron una absorción inferior a las piezas rosadas. La dispersión de los registros, puede atribuirse a la falta de control de calidad en la época y a la falta de normativas que estandarizaran los procesos de producción de los productos cerámicos. Adicional a esto, Torres et al. (2016) indican que las unidades recocidas pueden presentar mayores densidades y resistencias a compresión.

5.5.2 Resistencia a compresión en unidades cerámicas

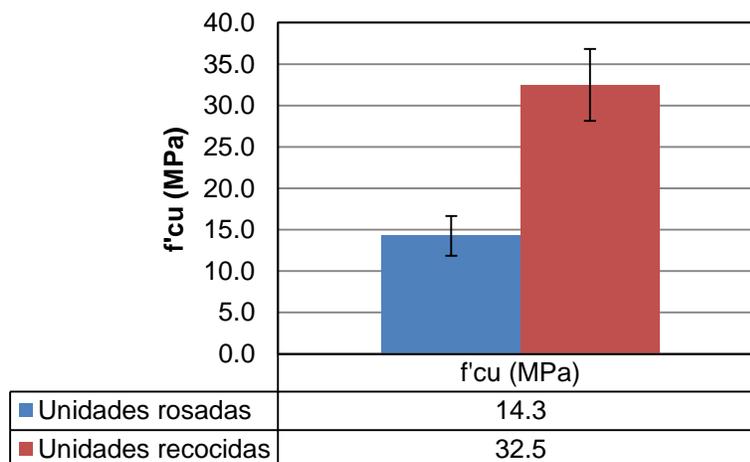
Este ensayo se realizó en cinco unidades rosadas y cinco recocidas, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NTC 4017. De igual manera, las muestras fueron cortadas a la mitad de su longitud. Básicamente, el ensayo consistió en aplicar una carga de compresión en las muestras, en la posición en la que trabajan los elementos en la mampostería, hasta llevarlos a la falla. Para esto se utilizó una prensa hidráulica con una capacidad de doscientas toneladas. En la Fotografía 5-1 se presenta el montaje de la prueba.



Fotografía 5-1 Ensayo de resistencia a compresión en unidades de mampostería

Fuente: El autor

En los ladrillos rosados se obtuvo una resistencia promedio de 14.3 MPa, y en los recocidos, de 32.5 MPa. Las respectivas dispersiones fueron de 16.9 y 13.3%. En la Gráfica 5-4 se presentan los valores registrados. Asimismo, las resistencias resultaron similares a las obtenidas por Torres et al. (2016); en el caso de las muestras rosadas, presentaron similitud con los valores reportados por Costigan et al. (2015).



Gráfica 5-4 Resistencia a compresión de unidades de mampostería

Fuente: El autor

Con base a lo anterior, se observa que las unidades recocidas presentaron una resistencia aproximadamente al doble de la registrada en las piezas rosadas. Esto corrobora que un grado de cocción superior, puede aumentar la resistencia a compresión de los ladrillos. A su vez, también se puede inferir que los especímenes recocidos son menos porosos que los rosados, lo cual se verificó en la prueba de absorción.

5.5.3 Módulo de rotura en unidades cerámicas

El módulo de rotura o resistencia a flexión, brinda una medida indirecta de la resistencia a tensión de las unidades de mampostería. De este modo, dicho valor determina la resistencia a la fisuración (Molano & Torres, 2017). La prueba se realizó en cinco unidades rosadas y cinco recocidas, siguiendo la metodología de la norma NTC 4017.

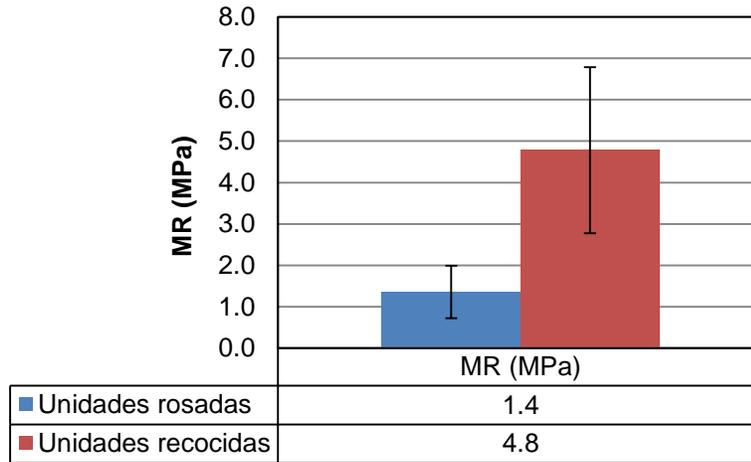
Principalmente, la prueba consistió en colocar los ladrillos en apoyos simples, aplicando una carga puntual en el centro de la luz, en la dirección de servicio de la muestra, hasta la falla del elemento. La velocidad del cabezal de la máquina de ensayo, fue de 0.5 mm/min. Para ello, se utilizó una máquina Universal Shimadzu con capacidad de mil kilonewtons. En la Fotografía 5-2 se muestra el montaje del ensayo.



Fotografía 5-2 Ensayo módulo de rotura en unidades de mampostería

Fuente: El autor

En las unidades rosadas se obtuvo un módulo de rotura medio de 1.4 MPa, mientras que en las recocidas fue de 4.8 MPa. Las dispersiones correspondientes fueron de 46.7 % y 42.0%. En la Gráfica 5-5 se presentan los resultados. El módulo obtenido en las unidades recocidas, resultó similar al encontrado por Torres et al. (2016), mientras que el valor registrado en los ladrillos rosados, fue ligeramente inferior al reportado por los autores mencionados.



Gráfica 5-5 Módulo de rotura en unidades de mampostería

Fuente: El autor

De acuerdo a lo anterior, se observa que las unidades recocidas presentaron mayor resistencia a la flexión. Posiblemente, pueda ligarse al proceso de cocción de los ladrillos y por ende, a la estructura interna de los elementos, aumentando su resistencia. De igual forma, las dispersiones registradas fueron similares a las obtenidas por Torres et al. (2016), quienes atribuyeron los altos valores, a la calidad de los especímenes y a una posible falta de control durante su proceso de producción.

5.6 Caracterización de morteros

5.6.1 Resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión permite evaluar el desarrollo de la resistencia en morteros a diferentes edades. Para esto, el ensayo se realizó en cubos de 5 cm de

arista, tomando como referencia el procedimiento de la norma NTC 220 *“Determinación De la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 plg de lado”*.

Los morteros analizados fueron de cal y arena (MCA) y adicionados con metacaolín (MMK) y polvo de ladrillo (MPL). Asimismo, la prueba se ejecutó en seis cubos, la mitad de ellos curados en una cámara de humedad y temperatura, con las siguientes condiciones controladas: temperatura de 25 ± 2 °C y humedad relativa de $55 \pm 5\%$; la mitad restante de los especímenes, se curó en una cámara de carbonatación controlada, a una temperatura de 23 °C, humedad relativa de 65% y concentración de dióxido de carbono del 5%. Las edades de ensayo fueron de siete, veintiocho, sesenta y noventa días.

Básicamente, el ensayo consistió en aplicar una carga de compresión en los cubos, por una de las caras laterales que estuvo en contacto con el molde, hasta llevarlos a la falla. Para ello se utilizó una máquina universal Shimadzu, de mil kilonewtons de capacidad. En la Fotografía 5-3 se presenta el montaje de la prueba.

En la Tabla 5-7 se presentan las resistencias a compresión a siete, veintiocho, sesenta y noventa días, para los morteros carbonatados (C) y no carbonatados (NC). De igual manera, se presentan las desviaciones estándar y el porcentaje de dispersión del ensayo. Adicionalmente, en la Gráfica 5-7 se presentan los resultados en forma de barras, mientras que en la Gráfica 5-7 se presentan las curvas de evolución de dicha propiedad.



Fotografía 5-3 Ensayo de resistencia a compresión en cubos de mortero

Fuente: El autor

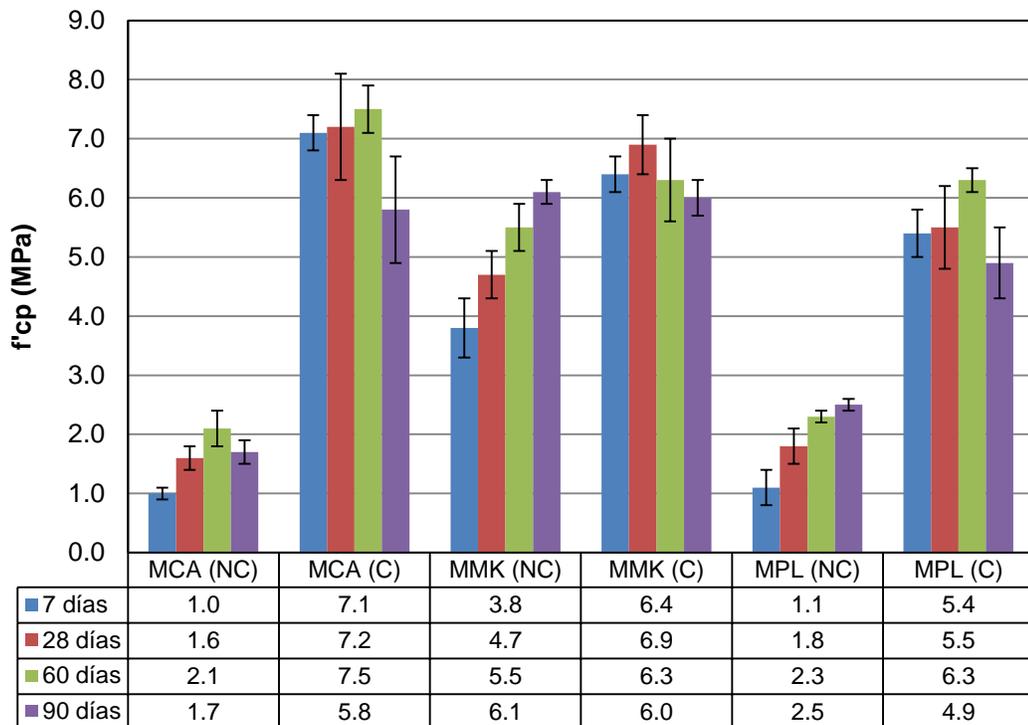
Tabla 5-7 Resistencia a compresión de morteros

Mortero	Edad (días)	f'_{cp} (MPa)	σ (MPa)	Dispersión (%)
MCA (NC)	7	1.0	0.1	6.0
	28	1.6	0.2	9.8
	60	2.1	0.3	14.8
	90	1.7	0.2	11.8
MCA (C)	7	7.1	0.3	4.1
	28	7.2	0.9	11.8
	60	7.5	0.4	4.8
	90	5.8	0.9	15.5
MMK (NC)	7	3.8	0.5	12.1
	28	4.7	0.4	9.3
	60	5.5	0.4	7.5
	90	6.1	0.2	3.4
MMK (C)	7	6.4	0.3	5.0
	28	6.9	0.5	7.2
MMK (C)	60	6.3	0.7	11.6
	90	6.0	0.3	5.8

Tabla 5-7 (Continuación)

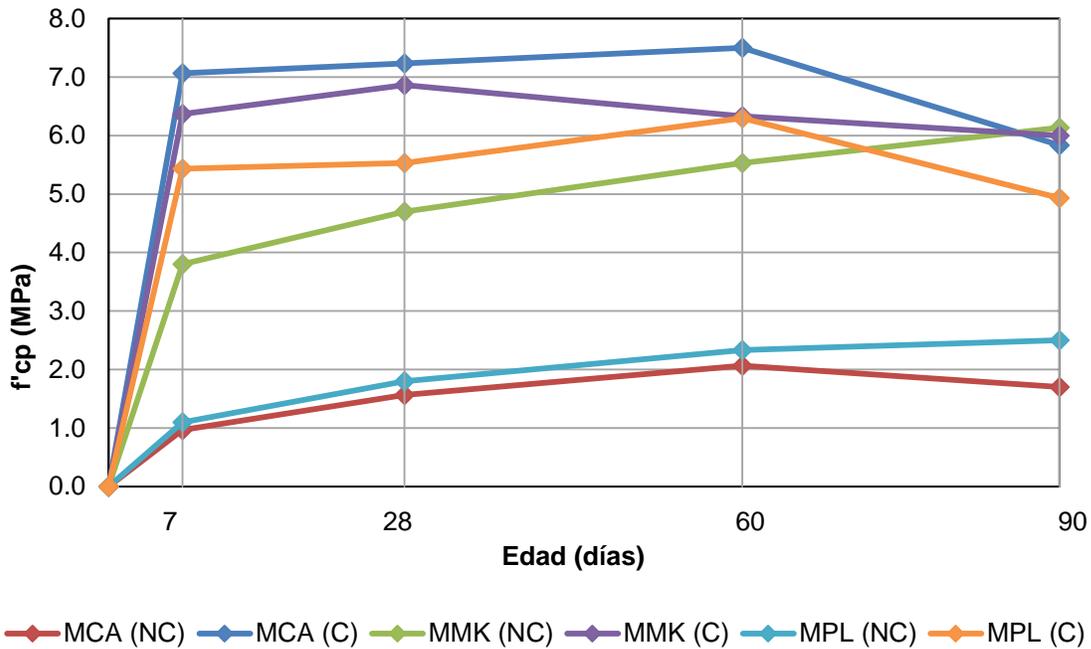
Mortero	Edad (días)	f'cp (MPa)	σ (MPa)	Dispersión (%)
MPL (NC)	7	1.1	0.3	24.1
	28	1.8	0.3	19.2
	60	2.3	0.1	2.5
	90	2.5	0.1	4.0
MPL (C)	7	5.4	0.4	7.4
	28	5.5	0.7	12.8
	60	6.3	0.2	3.2
	90	4.9	0.6	11.2

Fuente: El autor



Gráfica 5-6 Resistencia a compresión de morteros

Fuente: El autor



Gráfica 5-7 Evolución de la resistencia a compresión de morteros

Fuente: El autor

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el mortero de cal y arena se observa un incremento considerable en la resistencia de las muestras carbonatadas, en comparación con las no carbonatadas. A siete, veintiocho, sesenta y noventa días, dicho aumento fue de 631%, 362%, 263% y 243%, respectivamente. Este fenómeno, ratifica la tasa baja de endurecimiento de este mortero, tal y como afirmaron Moropoulou et al. (2005). De igual manera, la resistencia a veintiocho días fue similar a la obtenida por Pozo-Antonio (2015). Asimismo, en los cubos carbonatados se observó una caída de resistencia del 22%; autores como Velosa et al. (2009) y Aggelakopoulou et al. (2011) atribuyen tal decremento a la aparición de microfisuras por la retracción de la mezcla. En cuanto a los cubos sin carbonatar, la baja de resistencia fue de 18%, y según Lanas y Alvarez (2003), puede deberse a la presencia de portlandita sin carbonatar.

Por otro lado, en el mortero adicionado con metacaolín, las resistencias de los cubos carbonatados con respecto a los no carbonatados, resultaron superiores en 68%, 46% y 14% a siete, veintiocho y sesenta días; a los noventa días resultó menor en 2%. Adicional a lo anterior, la resistencia de las muestras carbonatadas presentó un descenso

del 13%; este fenómeno también se presentó en los estudios de Velosa et al. (2009) y Aggelakopolou et al. (2011), debido a la aparición de microfisuras por retracción. Por otra parte, las resistencias obtenidas en los especímenes no carbonatados resultaron superior entre 168% y 293%, con respecto a las registradas en los ejemplares fabricados con la mezcla de cal y arena. En los elementos carbonatados, las resistencias fueron menores entre 5% y 16% en los primeros sesenta días, mientras que, a noventa días, dicho valor fue mayor en un 3%.

Por otra parte, en el mortero adicionado con polvo de ladrillo, las resistencias de las muestras carbonatadas, con relación a las no carbonatadas, resultaron superiores en 394%, 207%, 170% y 97% a siete, veintiocho, sesenta y noventa días, respectivamente. En el caso de los cubos carbonatados, se presentó un decremento del 22% en la resistencia, paralelo al observado en la mezcla de cal y arena. Adicional a lo anterior, las resistencias de los especímenes no carbonatados fueron mayores entre 14% y 47%, con respecto a las registradas en los elementos sin carbonatar de cal y arena. Para los ejemplares carbonatados, las resistencias fueron menores entre 16% y 24%.

En cuanto a la evolución de la resistencia de los morteros, se evidencia que las mezclas con adiciones y sometidas a carbonatación acelerada, presentaron resistencias menores a las registradas en los cubos de cal y arena carbonatados. Esto puede deberse al proceso de envejecimiento acelerado, ya que los componentes de las adiciones pudieron reaccionar rápidamente con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente en la cal, formando otros compuestos como silicatos de calcio y aluminatos de calcio. En el caso de los morteros sin carbonatar, se observa que las adiciones mejoraron la resistencia a compresión.

Por último, a los noventa días, el mortero adicionado con metacaolín, no carbonatado, presentó la mayor resistencia. Además, su tasa de endurecimiento fue superior a la de las otras mezclas, por lo que la dosificación adicionada propuesta resultaría útil para rehabilitaciones de edificaciones históricas. Por consiguiente, dicha mezcla se seleccionó para la construcción de los muretes de mampostería del presente estudio.

5.6.2 Profundidad de carbonatación

De acuerdo a lo encontrado en la literatura y con base a los resultados de los ensayos de compresión en morteros carbonatados, la concentración de CO_2 es un parámetro que

incide significativamente en la velocidad de carbonatación y de endurecimiento en las mezclas. Dado que la concentración natural de CO₂ en la atmósfera es aproximadamente de 0.035%, el proceso de carbonatación natural de los morteros resulta lento, llegando a durar varios años en completarse. Adicionalmente, autores como Ho y Lewis (1987) y Van Balen y Van Gemert (1994), afirman que el proceso de difusión y progreso de la carbonatación, puede describirse por medio de una expresión como la de la Ecuación 5-1.

$$X = X_0 + K\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 5-1}$$

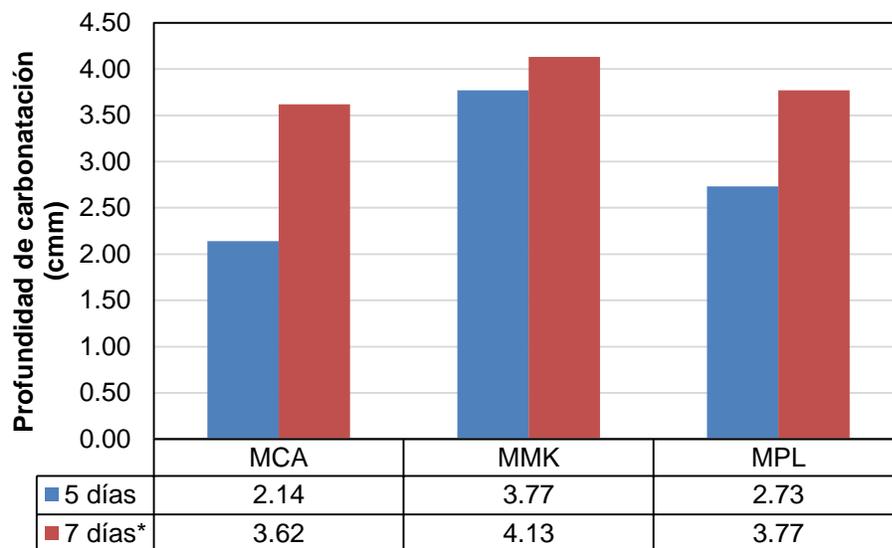
donde X corresponde a la profundidad de carbonatación, X₀ representa la profundidad del frente de carbonatación al inicio del proceso acelerado (suele ser muy pequeña), mientras que t es el tiempo de exposición al CO₂.

Con el fin de poder evaluar dicha constante, se realizaron ensayos de carbonatación acelerada en los morteros fabricados. Para esto, se elaboraron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales fueron transferidas a una cámara de carbonatación bajo las siguientes condiciones controladas: temperatura de 23 °C, humedad relativa de 65% y una concentración dióxido de carbono del 5%. Inicialmente, las probetas se dejaron en la cámara por un período de cinco días. Después de esto, se cortó una rodaja de aproximadamente cinco centímetros de espesor (ver Fotografía 5-4). Acto seguido, se aplicó fenolftaleína en la cara cortada y se midió la profundidad del frente de carbonatación en ocho puntos diferentes; a partir de esto se calculó el promedio. Posteriormente, se aplicó epóxico en la cara afectada de los cilindros, y se llevaron nuevamente a la cámara por un período de dos días, para las muestras de cal y arena y adicionados con polvo de ladrillo, mientras que los especímenes adicionados con metacaolín se dejaron por un día, debido a que la carbonatación inicial en estas muestras fue mayor. Cumplidas dichas edades, se repitió el procedimiento para registrar la profundidad de carbonatación. En la Gráfica 5-8 se indican las profundidades promedio del frente de carbonatación, y adicionalmente, en la Fotografía 5-5 se presentan fotografías del frente de carbonatación en los morteros de estudio.



Fotografía 5-4 Corte de probetas para evaluar la profundidad de carbonatación

Fuente: El autor



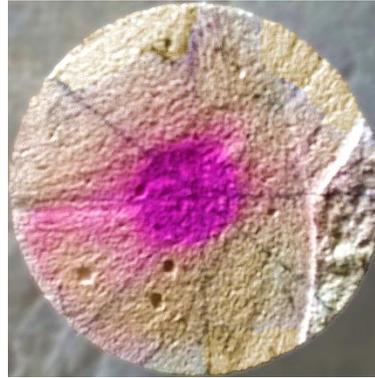
*Valor evaluado a seis días de exposición en cámara de carbonatación

Gráfica 5-8 Profundidad de carbonatación

Fuente: El autor



MCA 5 días



MCA 7 días



MMK 5 días



MMK 6 días



MPL 5 días



MPL 7 días

Fotografía 5-5 Avance del frente de carbonatación en morteros de cal

Fuente: El autor

De lo anterior se aprecia que las profundidades del frente de carbonatación resultaron mayores en los morteros adicionados; este comportamiento también se presentó en el estudio de Pavlík et al. (2012). Torres (2014) observó el mismo fenómeno en muestras de concreto adicionadas con metacaolín y catalizador de craqueo catalítico, relacionando la introducción de puzolanas con una significativa reducción de la reserva alcalina y un incremento en la cantidad de producto cementante como CSH. Adicionalmente, Zornoza (2009, citado por Torres, 2014), atribuye tal comportamiento a la reducción de portlandita, que actúa como una barrera química, generándose de esta forma, mayor profundidad de carbonatación en las muestras adicionadas. Adicionalmente, en los morteros de cal y arena y adicionados con metacaolín y polvo de ladrillo, se observan aumentos de la profundidad del frente de carbonatación de 69%, 9% y 38%, respectivamente. El hecho de que dichos incrementos hayan resultado menores en las mezclas adicionadas, posiblemente se deba a que durante las reacciones exotérmicas que se generan entre los componentes de las adiciones, el agua y la cal, se reduzcan las tasas de hidratación de los morteros.

Por otro lado, con los resultados de profundidad de carbonatación obtenidos en las dos edades de ensayo, se estimó la constante de carbonatación acelerada de los morteros, por medio de la siguiente expresión (Linares & Sánchez, 2003):

$$K_A = \frac{(X_2^2 - X_1^2)^2}{\sqrt{t_2 - t_1}} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

donde K_A corresponde a la constante de carbonatación acelerada, mientras que X_1 y X_2 se refieren a las profundidades promedio del frente de carbonatación en la primera (t_1) y segunda (t_2) edad de ensayo. En la Tabla 5-8 se presentan las constantes de carbonatación acelerada de las mezclas estudiadas.

Tabla 5-8 Constantes de carbonatación acelerada, estimadas en morteros de cal

Mortero	K_A (cm/día ^{0.5})
MCA	2.07
MMK	1.71
MPL	1.84

Fuente: El autor

Con respecto a las constantes de carbonatación estimadas, se observa que la tasa del mortero adicionado con metacaolín fue inferior a la de la mezcla de cal y arena un 17%, mientras que, para el mortero adicionado con polvo de ladrillo, dicho valor fue menor en un 11%. De este modo, se aprecia la relación que existe entre la tasa de carbonatación con la resistencia a compresión de los morteros, tal y como observaron El-Turki et al. (2009) y Arizzi et al. (2011).

Complementando lo anterior, las tasas de carbonatación acelerada (K_A) y natural (K_N) pueden relacionarse por medio de la raíz cuadrada de la relación entre las concentraciones de CO_2 , utilizando la siguiente ecuación (Castro, Ferreira, Lopes, Cascudo, & Carasek, 2004):

$$\frac{K_A}{K_N} = \sqrt{\frac{A}{N}} \quad \text{Ecuación 5-3}$$

donde A corresponde a la concentración de CO_2 en un ambiente acelerado, mientras que N representa la concentración presente en la atmósfera. Considerando que en este estudio la concentración acelerada de CO_2 fue del 5%, y la de la atmósfera es de alrededor 0.035%, en la Tabla 5-9 se presentan las constantes naturales de carbonatación estimadas para las mezclas de estudio.

Tabla 5-9 Constantes de carbonatación natural, estimadas en morteros de cal

Mortero	K_N (cm/día ^{0.5})
MCA	0.17
MMK	0.14
MPL	0.15

Fuente: El autor

5.7 Caracterización del refuerzo de la mampostería

5.7.1 Malla electrosoldada

En la malla electrosoldada utilizada para reforzar la mampostería, se realizaron pruebas de tensión y corte en la soldadura, en sentido longitudinal y transversal. Para esto, se tomó como referencia la norma NTC 5806 “Alambre de acero liso y grafilado y mallas electrosoldadas para refuerzo de concreto”.

El ensayo a tensión, consistió en colocar un grafil de la malla, entre la mordazas de una máquina universal Shimadzu, de mil kilonewtons de capacidad. Adicionalmente, se colocó un extensómetro para determinar el punto de fluencia del elemento (ver Fotografía 5-6); la carga de tensión se aplicó hasta la falla de la probeta. Este ensayo se realizó en cinco grafites longitudinales y en cinco transversales. De otro lado, la prueba de corte en la soldadura consistió en colocar un nudo de la malla en un aditamento como el mostrado en la Fotografía 5-7, de tal modo que al aplicarle carga, fallara la conexión de los alambres.



Fotografía 5-6 Tensión en alambre de la malla electrosoldada

Fuente: El autor



Fotografía 5-7 Corte en la soldadura de la malla electrosoldada

Fuente: El autor

En los alambres longitudinales se registró una resistencia promedio a tracción de 636 MPa, mientras que en los elementos transversales fue de 639 MPa. Adicionalmente, la

resistencia a fluencia promedio en ambos alambres fue de 638 MPa. Con relación a la fuerza cortante promedio en la soldadura, se obtuvo un valor de 9 672 N.

5.7.2 Barras de GFRP

En las barras de GFRP utilizadas para reforzar las juntas de mampostería, se efectuaron ensayos de tensión. Para esto, se tomó como referencia la norma ASTM D7205 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*”. Esta prueba se desarrolló en tres barras.

Para el ensayo, previamente se embebieron las barras en unas tuberías de acero, utilizando mortero expansivo. Cuarenta y ocho horas después, se realizó la prueba a tensión. Esta consistió en colocar las barras entre las mordazas de una máquina universal Shimadzu de mil kilonewtons de capacidad. Adicional a esto, se colocó un extensómetro para registrar las deformaciones del elemento (ver Fotografía 5-8); la carga de tensión se aplicó hasta la falla de las probetas.



Fotografía 5-8 Ensayo a tensión en barra de GFRP

Fuente: El autor

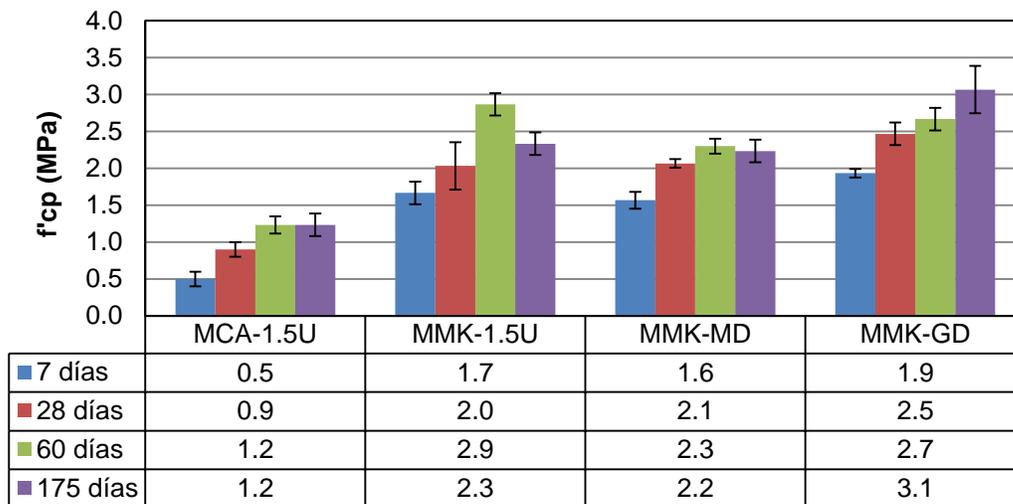
De acuerdo con lo anterior, se obtuvo esfuerzo promedio último a tensión de 990 MPa. De igual manera, el módulo elástico medio fue de 46 143 MPa. Adicionalmente, las barras fallaron en la zona del anclaje, en lugar del tercio medio, lo que indica que se presentó concentración de esfuerzos en los extremos de las probetas; además, también se observó cierto deslizamiento entre la barra y el mortero expansivo. Por otro lado, de acuerdo a la ficha técnica del fabricante, las barras tienen una resistencia última de 1 000 MPa, mientras que su módulo elástico es de 50 000 MPa. Estos valores no se alcanzaron, probablemente por el deslizamiento de los elementos; sin embargo, los datos registrados no difieren más del 8% de los especificados.

5.8 Caracterización de la mampostería

5.8.1 Caracterización del mortero de pega

De las mezclas elaboradas para las juntas de mampostería, se fabricaron cubos de 5 cm de arista; de acuerdo a su aplicación se numeraron de la siguiente manera: para los muretes unidad y media, con mortero de cal y arena, se les dio la numeración MCA-1.5U, para los especímenes de unidad y media, mediano y grandes, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, se les denominó MMK-1.5U, MMK-MD y MMK-GD, respectivamente. En las probetas fabricadas se realizaron pruebas de compresión, de acuerdo al procedimiento descrito en la NTC 220. Con base a esto, en la Gráfica 5-9 se presentan las resistencias obtenidas a siete, veintiocho, sesenta y ciento setenta y cinco días, mientras que en la Gráfica 5-10 se presentan las curvas de evolución de los morteros.

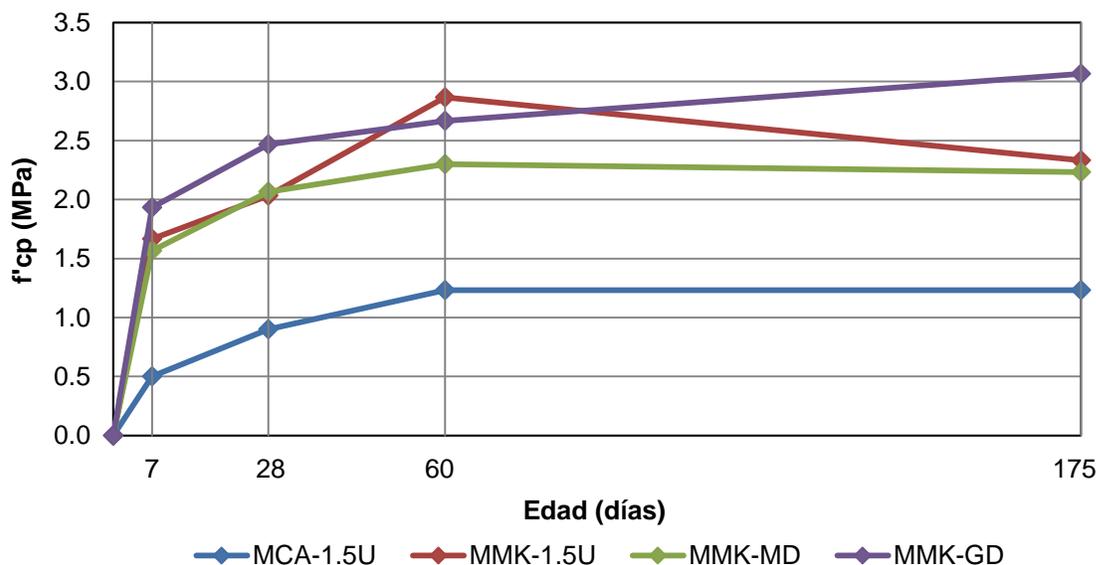
Resistencia a compresión en morteros de juntas de mampostería



Gráfica 5-9 Resistencia a compresión de morteros de juntas de mampostería

Fuente: El autor

Evolución de la resistencia a compresión en morteros de juntas de mampostería



Gráfica 5-10 Curvas de evolución de resistencia en morteros de las juntas de mampostería

Fuente: El autor

De acuerdo a lo anterior, en el mortero de cal y arena (MCA) se obtuvo una resistencia aproximadamente un 50% menor a la registrada en los especímenes que se curaron en la cámara de humedad y temperatura. Adicionalmente, las resistencias de los morteros adicionados con metacaolín, resultaron inferiores alrededor de un 60% a las obtenidas con el curado mencionado. Este fenómeno puede atribuirse a las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente natural, lo cual pudo generar microfisuras que afectaron las propiedades mecánicas de los morteros.

5.8.2 Resistencia a compresión en muretes de unidad y media

Este ensayo se realizó en ocho muretes fabricados con morteros de cal y arena, cuatro de estos sometidos a un proceso de carbonatación acelerada, y los restantes curados a la intemperie. Debido a que la constante de carbonatación acelerada en el mortero de cal se estimó con un valor de $2.07 \text{ cm/día}^{0.5}$, por medio de la ecuación 5-1 se determinó el tiempo necesario para que el frente de carbonatación penetrara 6 cm en las juntas de los elementos, por ambas caras, considerando un espesor nominal de las muestras de 12 cm. De este modo, el tiempo necesario para carbonatar completamente el mortero resultó de nueve días; sin embargo, para garantizar que las juntas se carbonataran completamente, los ejemplares se dejaron en la cámara de carbonatación, por un período de treinta días. Asimismo, las condiciones controladas de la cámara fueron las mismas que se utilizaron para predecir las constantes de carbonatación acelerada. Adicional a lo anterior, también se ensayaron doce especímenes elaborados con mezcla adicionada con metacaolín, con las siguientes características: seis de ellos sin reforzar, tres reforzados con malla, mientras que los restantes se reforzaron con barras de GFRP en las juntas. Cabe resaltar que estas muestras se curaron en condiciones ambientales.

Por otro lado, el ensayo se ejecutó de acuerdo con lo estipulado en la norma NTC 3495 *“Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de muretes de mampostería”*. Básicamente, la prueba consistió en aplicar una carga de compresión en los muretes en la posición de servicio, hasta llevarlos a la falla. Para esto se utilizó una máquina Shimadzu, con una capacidad de mil kilonewtons. En la Fotografía 5-20 se presenta el montaje de la prueba.

En los muretes fabricados con mortero de cal y completamente carbonatados se obtuvo una resistencia promedio de 4.2 MPa, mientras que en los elementos curados en el

ambiente se registró un valor de 2.9 MPa. Las respectivas dispersiones fueron de 19.7% y 18.2%. En cuanto al mecanismo de falla, se observaron fisuras verticales en las unidades cerámicas y en el mortero de pega (ver Fotografía 5-9). Esto indica que los ladrillos fallaron por tensión, debido a la adherencia con el mortero de pega.

Después de la prueba de compresión, se procedió a revisar el frente de carbonatación en las juntas de los muretes, por lo que se les aplicó fenolftaleína. En el caso de las muestras carbonatadas, se observó que el mortero se encontraba carbonatado en su totalidad (ver Fotografía 5-10), mientras que en las juntas de los especímenes curados en condiciones ambientales, se observó una carbonatación parcial (ver Fotografía 5-11). En estas últimas, el avance del frente de carbonatación fue variable debido a que en algunas muestras era de alrededor 3 cm, mientras que en otras de unos 5 cm. Teniendo en cuenta la constante de carbonatación natural estimada para este tipo de morteros, con un valor de $0.17 \text{ cm/d}^{0.5}$, las juntas del murete tomarían alrededor de mil doscientos cuarenta y seis días en carbonatarse completamente. Sin embargo, se observó que el frente de carbonatación avanzó con una tasa mayor. Tomando como referencia los resultados obtenidos por Pavlik et al. (2012) en mezclas sometidas a carbonatación acelerada, podría decirse que, durante los primeros días de curado, la tasa de carbonatación es alta, seguida de un descenso. De esta manera, existe la posibilidad de que, en el presente estudio, se haya registrado la constante de carbonatación en la zona donde se presenta el descenso de la tasa de carbonatación en los morteros. Además, otros factores como las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente pudieron influir en dicho proceso.



Fotografía 5-9 Mecanismo de falla de murete de unidad y media, elaborado con mortero de cal y arena

Fuente: El autor



Fotografía 5-10 Junta de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal, completamente carbonatada

Fuente: El autor



Fotografía 5-11 Junta de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal, parcialmente carbonatada

Fuente: El autor

Por otra parte, en la Fotografía 5-11 se aprecia que, en la zona central de la junta del murete, no hay mortero de pega. Esto pudo deberse a que se colocó poco contenido de mortero, o por descuido, no se aplicó material en dicha zona. En consecuencia, al presentarse la retracción del material, quedó un orificio que no fue evidente hasta el momento de retirar los ladrillos para verificar la carbonatación de las juntas. Este fenómeno también se registró en algunos especímenes construidos con mezcla adicionada con metacaolín.

Con respecto a los muretes elaborados con mortero adicionado con metacaolín, sin refuerzo y reforzados con malla electrosoldada por una de sus caras externas y con barras de GFRP embebidas dentro de las juntas de mortero, se obtuvieron resistencias promedio de 3.2 MPa, 4.6 MPa y 6.7 MPa, respectivamente. Las correspondientes dispersiones, fueron de 28.5%, 12.1% y 30.2%. En cuanto a los mecanismos de falla, en los especímenes no reforzados se presentaron fisuras verticales en las unidades cerámicas y en el mortero (ver Fotografía 5-12), lo que indica que fallaron los ladrillos por tensión. En los muretes reforzados con malla electrosoldada, inicialmente se presentaron fisuras en el mortero de revoque (ver Fotografía 5-13). Posteriormente, comenzaron a aparecer fisuras verticales en los ladrillos, hasta su falla por tensión (ver Fotografía 5-14). Adicional a lo anterior, los anclajes de la malla electrosoldada no se

vieron afectados después de la falla del murete, lo cual garantizó su funcionamiento durante el ensayo. Por último, en los ejemplares reforzados con barras de GFRP, también se presentó la falla de los ladrillos por tensión. Adicionalmente, en la cara reforzada se registró un plano de falla que se atribuye a la buena adherencia entre el epóxico, la barra de GFRP y las unidades de mampostería (ver Fotografía 5-17).



Fotografía 5-12 Mecanismo de falla de murete de unidad y media, fabricado con mortero de cal adicionado con metacaolín, no reforzado

Fuente: El autor



Fotografía 5-13 Fisuración del revoque en murete de unidad y media, reforzado con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Fotografía 5-14 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, reforzado con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Fotografía 5-15 Anclaje de la malla electrosoldada en murete de unidad y media

Fuente: El autor



Fotografía 5-16 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, reforzado con barra de GFRP

Fuente: El autor



Fotografía 5-17 Plano de falla en la cara reforzada con barra de GFRP en murete de unidad y media

Fuente: El autor

En los muretes sin refuerzo, contruidos con mortero adicionado con metacaolín, también se aplicó fenolftaleína en las juntas para verificar el avance del frente de carbonatación. En este caso, en algunas muestras se observó carbonatación parcial, mientras que en otras el proceso fue completo (ver Fotografía 5-18 y Fotografía 5-19). Esto puede atribuirse a las reacciones entre los componentes del metacaolín y la portlandita de la cal, que en algunos casos pudieron presentarse de forma acelerada. Adicional a esto, la constante de carbonatación natural estimada para este tipo de mortero fue de $0.14 \text{ cm/día}^{0.5}$. En consecuencia, la junta del murete tardaría alrededor de mil ocho cientos treinta y siete días en carbonatarse completamente, discrepando de lo observado en las muestras. En este caso, para el mortero adicionado con metacaolín, posiblemente también se determinó la tasa de carbonatación en la zona donde la tasa se reduce, además de la posible incidencia de las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente.



Fotografía 5-18 Junta de mortero de cal adicionado con metacaolín, en murete de unidad y media

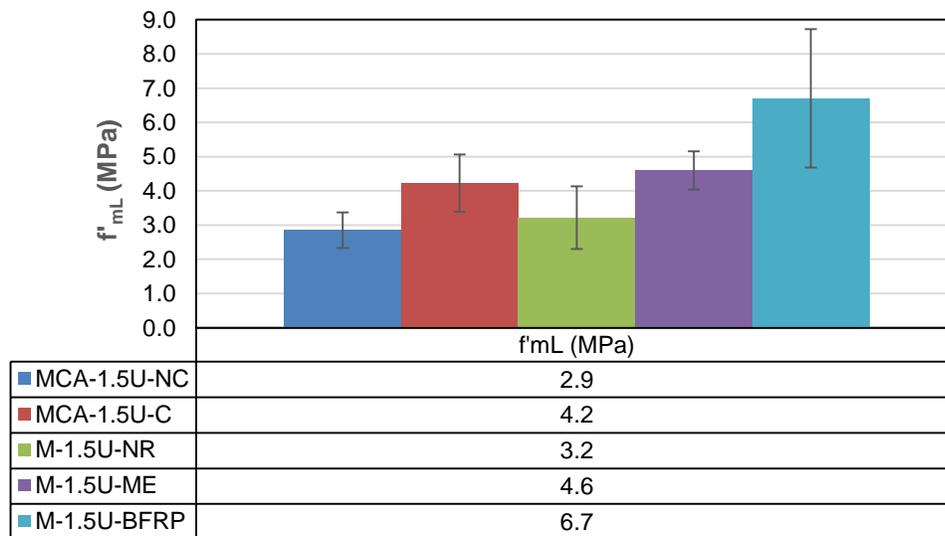
Fuente: El autor



Fotografía 5-19 Junta de mortero de cal adicionado con metacaolín, en murete de unidad y media

Fuente: El autor

Considerando lo anterior, en la Gráfica 5-11 se presentan las resistencias a compresión promedio, registradas en los siguientes muretes: elementos construidos con mortero de cal, no carbonatados (MCA-1.5U-NC) y carbonatados (MCA-1.5U-C), y ejemplares elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados (M-1.5-U-NR) y reforzados con malla electrosoldada (M-1.5-U-ME) y con barras de GFRP (M-1.5U-BFRP).



Gráfica 5-11 Resistencia a compresión en muretes de unidad y media

Fuente: El autor

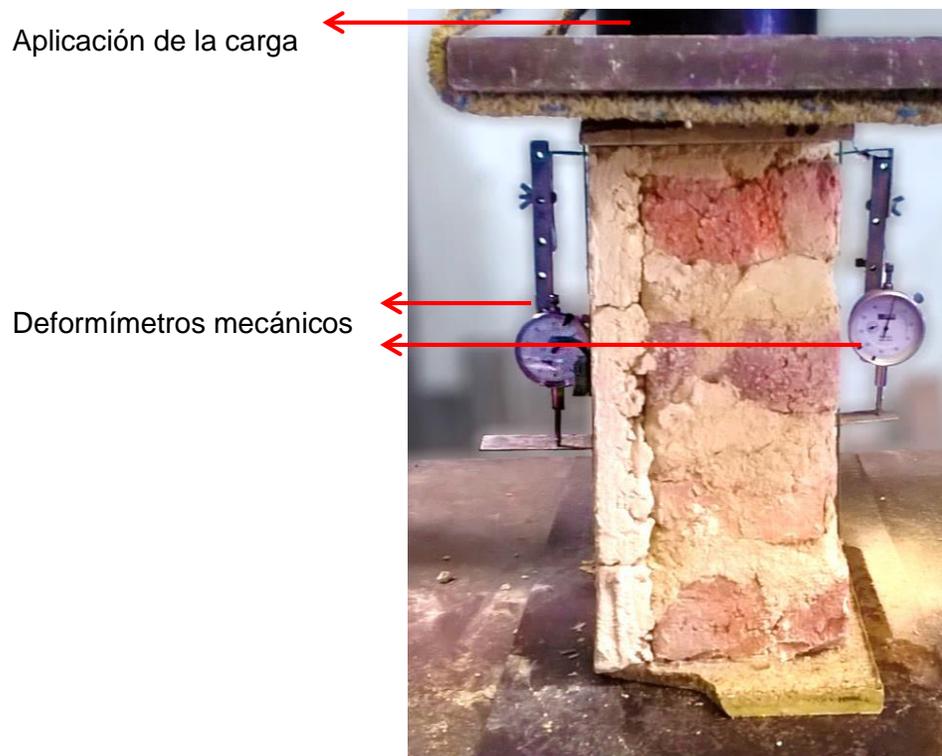
De acuerdo con lo anterior, se observa que los muretes con mortero de cal y arena, sometidos a un proceso de carbonatación acelerada, presentaron resistencias mayores en un 45% con respecto a las muestras con mortero no carbonatado en su totalidad. Con esto, se evidencia nuevamente la relación que existe entre la carbonatación de las mezclas y el desarrollo de la resistencia.

Con relación a los ejemplares construidos con mortero adicionado con metacaolín, se observa que su resistencia media resultó superior en un 10% a la determinada en los elementos fabricados con mezcla de cal sin carbonatar. Sin embargo, el esfuerzo a compresión resultó menor un 24% al registrado en los muretes que se carbonataron de forma acelerada. Esto puede deberse a que el mortero adicionado presenta una serie de reacciones químicas adicionales, en las que se producen silicatos hidratados y se ven afectadas por las condiciones de curado. De esta manera, las variaciones de temperatura y de humedad relativa pueden afectar dichos procesos químicos, reduciendo la tasa de ganancia de resistencia.

En cuanto a los elementos construidos con mortero adicionado y reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP, se aprecia que las resistencias fueron mayores en un 44% y 109%, con respecto a la registrada en los especímenes sin reforzar. Tales incrementos se atribuyen a una mejor distribución de esfuerzos entre la mampostería y el refuerzo.

5.8.3 Módulo elástico en muretes de unidad y media

Este ensayo se realizó durante la prueba de compresión. Para esto, se instalaron deformímetros mecánicos, con una precisión de milésima de pulgada, en las caras externas de los muretes. Básicamente, la prueba consistió en medir las deformaciones del elemento de mampostería determinada medida que se incrementaba la carga de compresión. En la Fotografía 5-20 se presenta el montaje del ensayo.



Fotografía 5-20 Ensayo de resistencia a la compresión y módulo elástico, en muretes de unidad y media

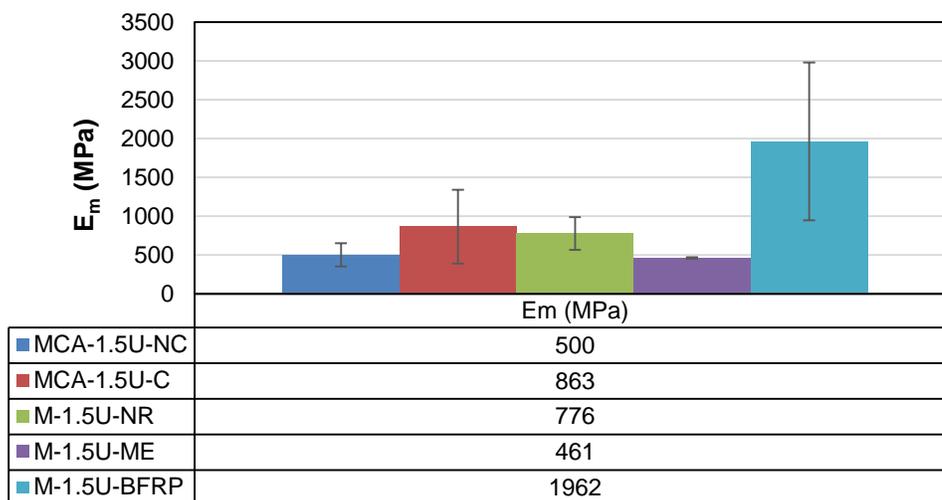
Fuente: El autor

Con las deformaciones registradas para las cargas específicas, se graficaron las curvas esfuerzo-deformación de los muretes estudiados. De este modo, el módulo elástico se calculó como la recta secante entre 5% y 33% de la resistencia de la mampostería, de acuerdo con lo especificado en el numeral D.5.2.1.2 de la NSR-10, utilizando la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{0.33f'_m - 0.05 f'_m}{\varepsilon_{0.33} - \varepsilon_{0.05}} \quad \text{Ecuación 5-4}$$

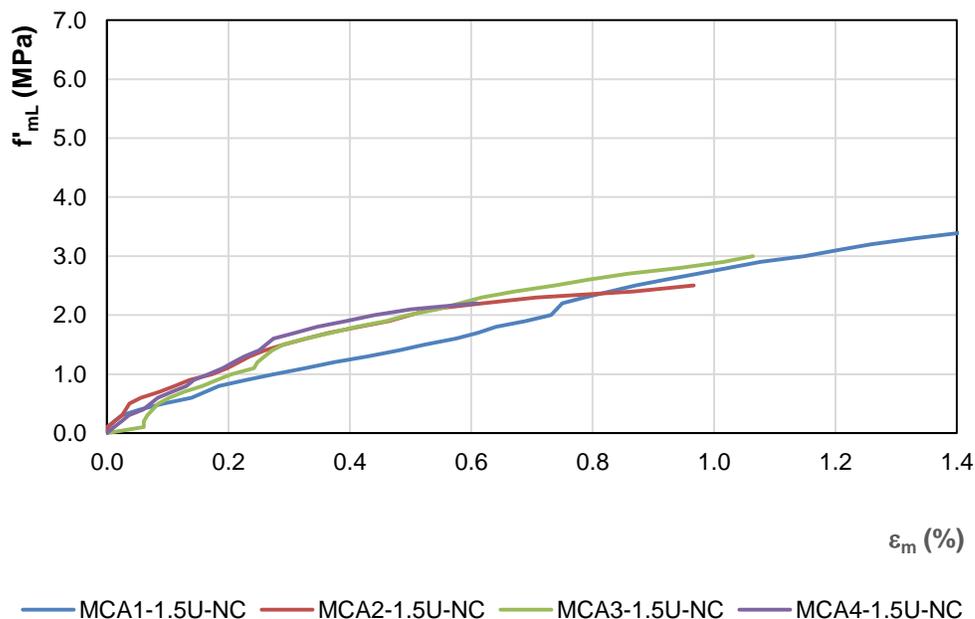
En los muretes construidos con mortero de cal, no carbonatados, se registró un módulo elástico promedio de 500 MPa, mientras que en los elementos carbonatados fue de 863 MPa. Las correspondientes dispersiones registradas fueron de 30% y 55%. Asimismo, en los especímenes fabricados con mortero adicionado, se determinaron módulos de 776 MPa, 461 MPa y 1962 MPa, en los ejemplares sin refuerzo y reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP, respectivamente. Los coeficientes de variación para

estos elementos fueron de 27%, 10% y 52%. En la Gráfica 5-12 se presentan los resultados registrados. Adicionalmente de la Gráfica 5-13 a la Gráfica 5-17, se muestran las curvas esfuerzo-deformación de los muretes evaluados.



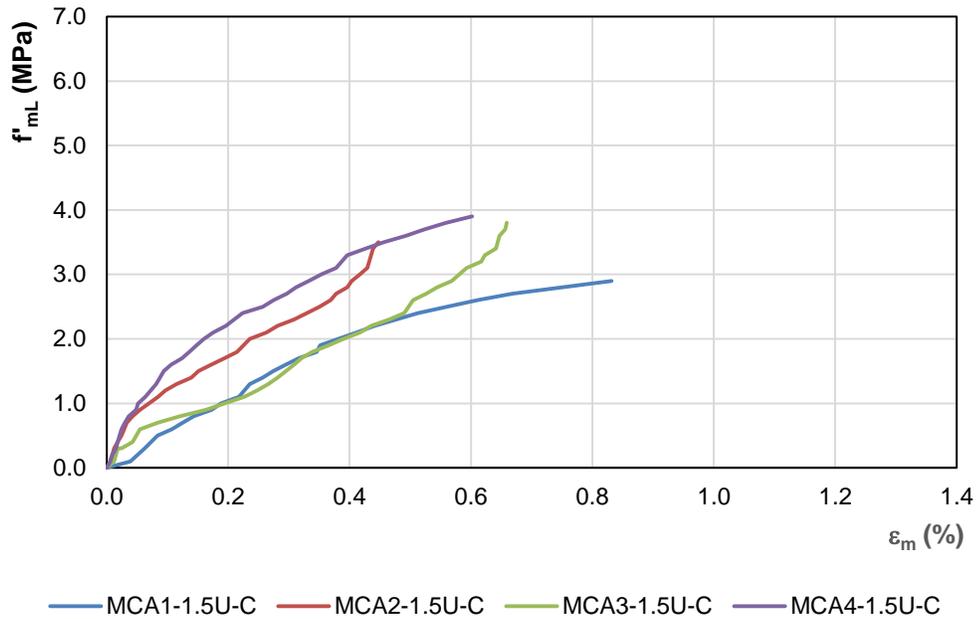
Gráfica 5-12 Módulo elástico de muretes de unidad y media

Fuente: El autor



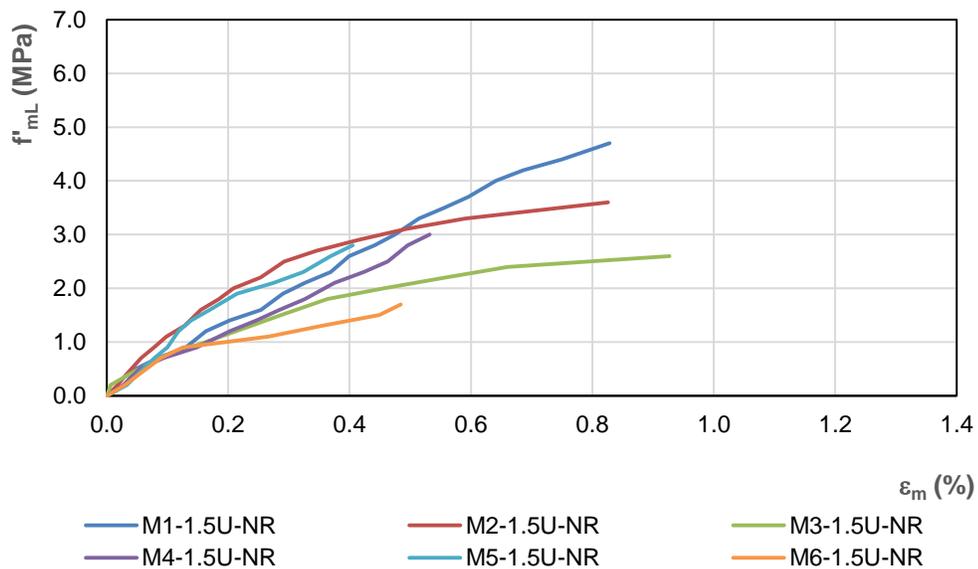
Gráfica 5-13 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal, no carbonatados

Fuente: El autor



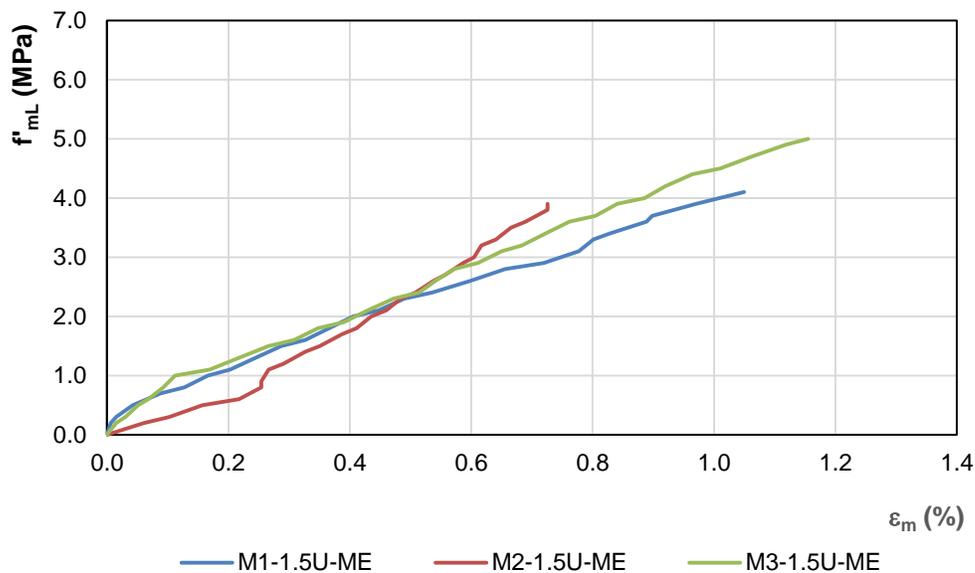
Gráfica 5-14 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal, carbonatados

Fuente: El autor



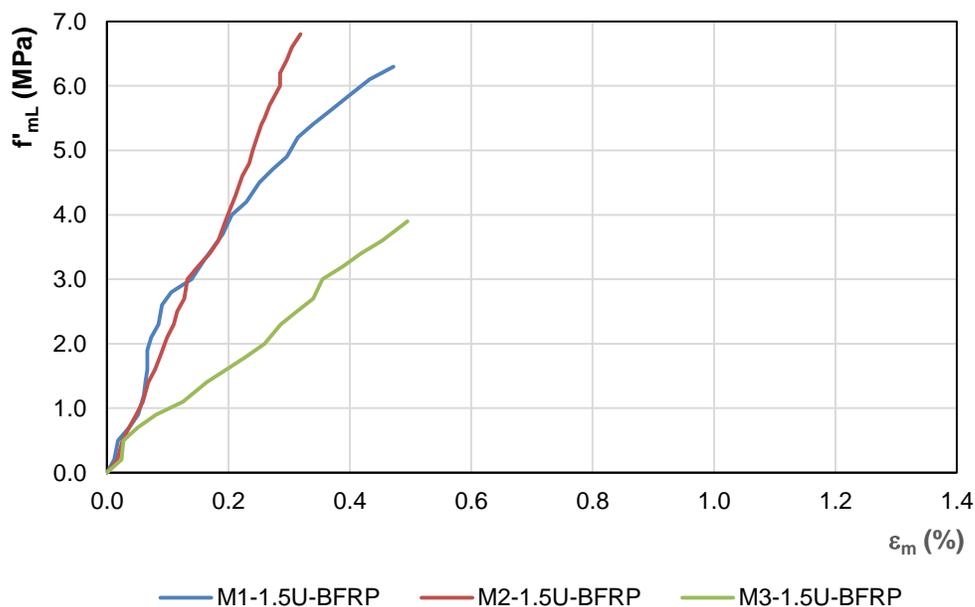
Gráfica 5-15 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados

Fuente: El autor



Gráfica 5-16 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Gráfica 5-17 Curvas esfuerzo-deformación en muretes de unidad y media, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP

Fuente: El autor

De acuerdo con lo anterior, el módulo elástico de los muretes construidos con cal y que fueron carbonatados, resultó mayor un 73%, con respecto al registrado en los elementos sin carbonatar. Dado que el módulo elástico se relaciona con la resistencia a compresión, es evidente que el proceso de carbonatación influye de manera positiva en la mampostería sentada en morteros de cal y arena.

Con relación a los muretes fabricados con mortero adicionado, se encontró que el módulo elástico resultó mayor un 55%, respecto al evaluado en los elementos fabricados con mezcla de cal, no carbonatados. Con respecto a los elementos carbonatados, el módulo resultó menor un 10%.

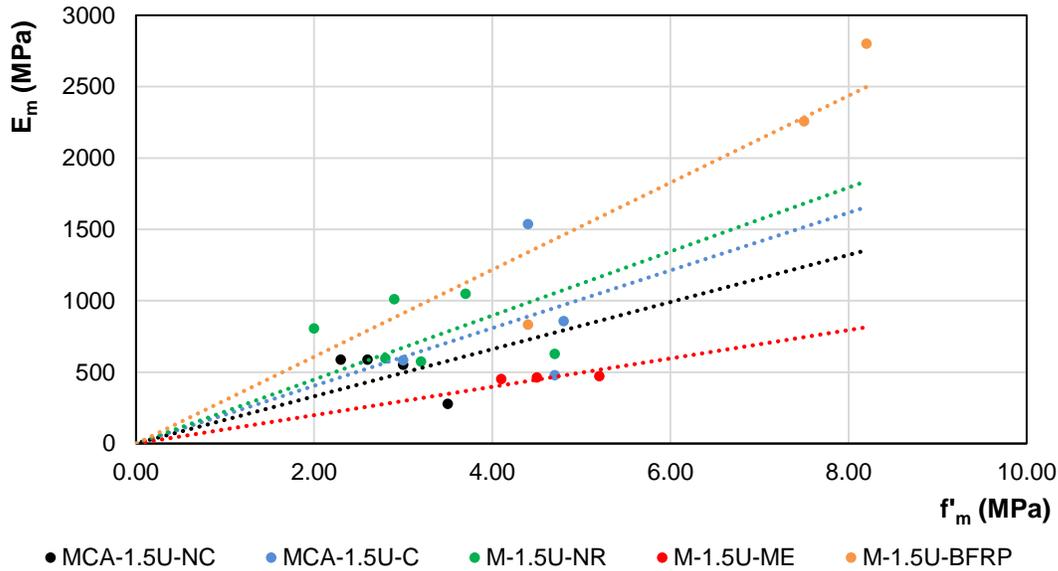
Por último, el módulo elástico de los muretes reforzados con malla electrosoldada resultó menor 41%, con relación a las muestras sin reforzar. A pesar de esto, la malla pudo mantener la integridad estructural de la mampostería, e incluso aumentar la ductilidad de los elementos. Por otro lado, el módulo determinado en los ejemplares reforzados con barras de GFRP fue mayor un 153%, con respecto a los especímenes no reforzados. Esto resultó análogo con la diferencia encontrada en las resistencias a compresión en la mampostería.

5.8.4 Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico, en muretes de unidad y media

El numeral D.5.2.1 de la NSR-10, especifica que si no se disponen de registros experimentales que permitan determinar el módulo elástico, puede utilizarse la expresión $E_m = 750f'_m$, para mampostería de arcilla. Sin embargo, dicha ecuación se aplica para sistemas construidos con morteros de cemento. Para el caso de mampostería sentada en morteros de se han encontrado valores mucho menores al especificado por el reglamento; evidencia de ello puede encontrarse en los estudios realizados por Costigan et al. (2015) y Torres et al. (2016).

Con base en los resultados obtenidos en las muestras de estudio, se planteó una correlación lineal entre la resistencia a compresión (f'_m) y el módulo elástico (E_m). Debido a que la cantidad de muestras por cada tipo de murete fue “pequeña”, no se determinó el coeficiente de determinación (R^2), puesto que estadísticamente no sería representativo en este estudio. En la Gráfica 5-18 se presenta la correlación de los datos y las líneas de

tendencia por cada tipo de murete. Adicionalmente, en la Tabla 5-10 se presentan las correlaciones estimadas.



Gráfica 5-18 Correlación entre f'_m y E_m , para muretes de unidad y media

Fuente: El autor

Tabla 5-10 Correlaciones entre f'_m y E_m , en muretes de unidad y media

Mampostería	Correlación entre f'_m y E_m
MCA-1.5U-NC	$E_m = 165f'_m$
MCA-1.5U-C	$E_m = 202f'_m$
M-1.5U-NR	$E_m = 224f'_m$
M-1.5U-ME	$E_m = 99f'_m$
M-1.5U-BFRP	$E_m = 305f'_m$

Fuente: El autor

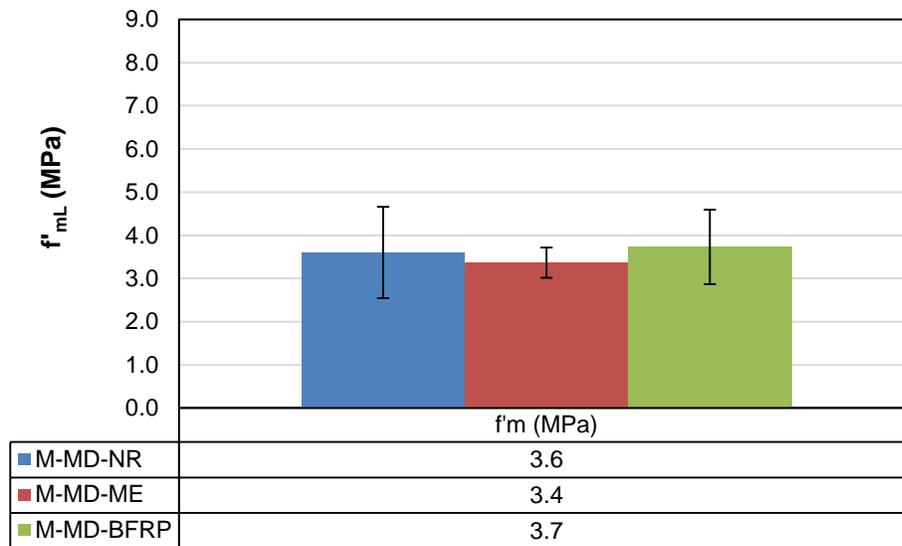
De acuerdo con lo anterior, se observa que los valores estimados resultan menores al especificado en la NSR-10 para mampostería con juntas de mortero de cemento, entre 59% y 87%. Asimismo, para muretes de unidad y media construidos con mortero de cal, Torres et al. (2016) encontraron una relación $E_m = 125f'_m$, resultando en el presente estudio mayor, debido a que el tiempo de curado fue aproximadamente al doble del empleado por dichos autores. De igual manera, la correlación determinada en los

elementos con mortero de cal y arena sin carbonatar resultó similar a la obtenida por Costigan et al. (2015) para una cal hidráulica natural de 5 MPa (NHL5).

5.8.5 Resistencia a compresión en muretes medianos

Este ensayo se realizó en nueve muretes medianos construidos con mortero de cal, adicionado con metacaolín, tomando como referencia el procedimiento descrito en la norma NTC 3495. Adicionalmente, tres de estos se dejaron sin refuerzo (M-MD-NR), tres se reforzaron con malla electrosoldada (M-MD-ME), y los restantes llevaban barras de GFRP embebidas en algunas juntas (M-MD-BFRP). En este caso, también se utilizó la máquina universal Shimadzu, de mil kilonewtons de capacidad. En la Fotografía 5-27 se presenta el montaje de la prueba.

En los muretes no reforzados, la resistencia a compresión promedio fue de 3.6 MPa, mientras que en los elementos reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP fueron de 3.4 MPa, y 3.7 MPa, respectivamente. Las correspondientes dispersiones fueron de 29%, 10% y 23%. En la Gráfica 5-19 se presentan los resultados obtenidos.



Gráfica 5-19 Resistencia a compresión en muretes medianos

Fuente: El autor

De lo anterior, se observa que la resistencia en los elementos no reforzados fue superior un 6%, con respecto a los especímenes reforzados con malla electrosoldada, y 3% menor, con relación a los ejemplares reforzados con barras de GFRP. Esto

posiblemente indica, que en elementos de mayor espesor el refuerzo no contribuye a la resistencia de la mampostería. Por otro lado, Torres et al. (2016) realizaron el mismo ensayo en muretes elaborados con mortero de cal y arena, registrando una resistencia de 2.7 MPa, con el mismo tipo de ladrillos y la misma configuración. Por ende, se evidenció que al utilizar mortero adicionado con metacaolín, la resistencia aumentó.

En lo que respecta a los mecanismos de falla, en todos los elementos se observaron fisuras verticales en las unidades y en el mortero de pega (ver Fotografía 5-21 a Fotografía 5-23). Esto indica que los ladrillos fallaron por tensión, debido a la adherencia con el material cementante. Adicional a lo anterior, en los elementos reforzados con malla electrosoldada, primero se presentó fisuración en el mortero de revoque (ver Fotografía 5-22), similar a lo apreciado en los especímenes de unidad y media. Del mismo modo, al final del ensayo se verificó el estado de la malla electrosoldada, encontrando que ésta no se vio afectada y que los anclajes tampoco fallaron (ver Fotografía 5-24). Por último, en los ejemplares reforzados con barras de GFRP, se apreció un plano de falla en la cara reforzada (ver Fotografía 5-26), debido a la buena adherencia entre el epóxico, la barra y las unidades cerámicas.



Fotografía 5-21 Mecanismo de falla en murete de unidad y media, no reforzado

Fuente: El autor



Fotografía 5-22 Fisuración del mortero de revoque en murete mediano, reforzado con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Fotografía 5-23 Mecanismo de falla en murete mediano, reforzado con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Fotografía 5-24 Malla de refuerzo después de la falla del murete

Fuente: El autor



Fotografía 5-25 Mecanismo de falla en murete mediano, reforzado con barras de GFRP

Fuente: El autor



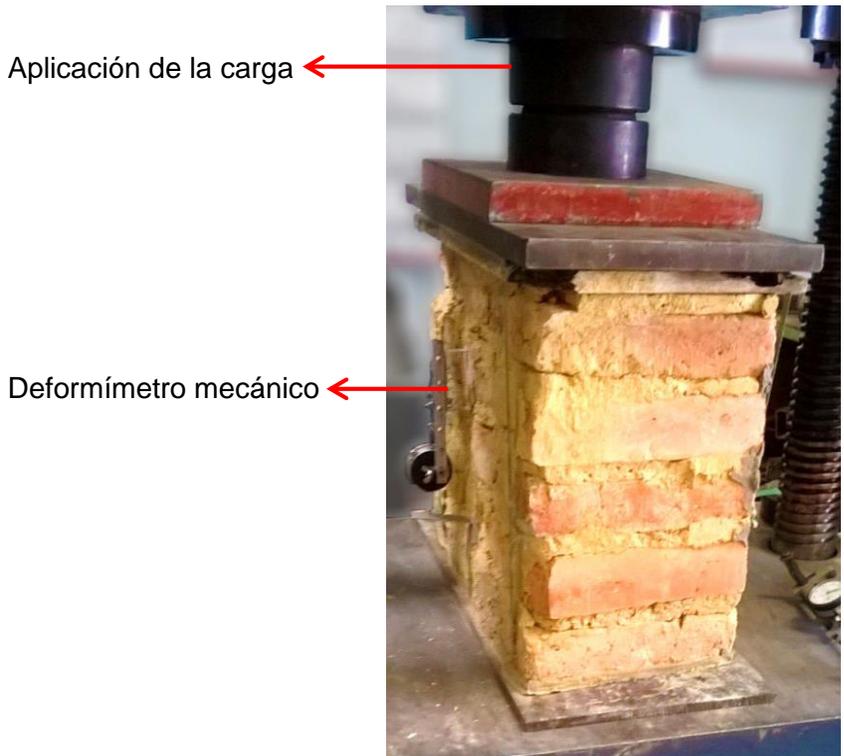
Fotografía 5-26 Plano de falla en cara reforzada con barras de GFRP, en murete mediano

Fuente: El autor

5.8.6 Módulo elástico en muretes medianos

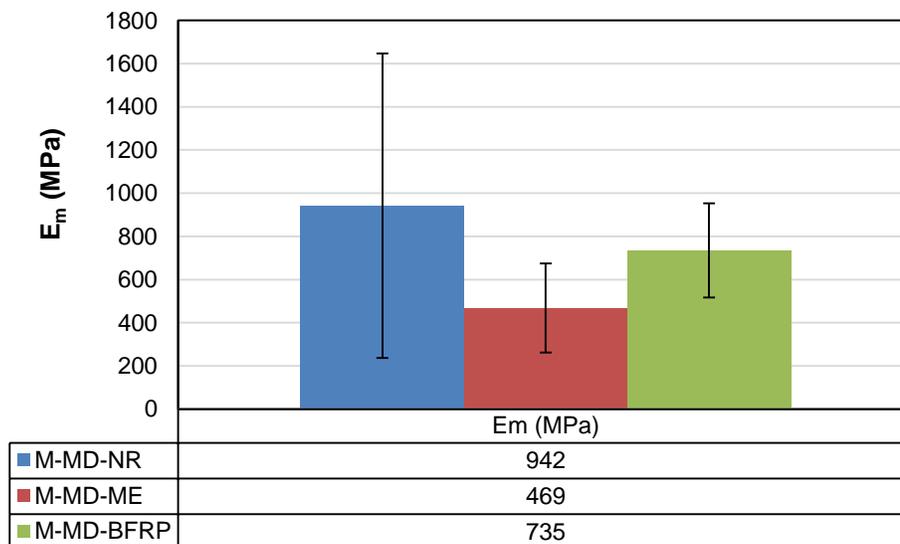
Esta prueba se realizó durante el ensayo de compresión. Para esto, nuevamente se utilizaron deformímetros mecánicos, con una precisión de milésima de pulgada. El montaje de la prueba se muestra en la Fotografía 5-27. Adicionalmente, el módulo elástico se calculó como la recta secante entre 5% y 33% de la resistencia de la mampostería, por medio de la Ecuación 5-4.

En los muretes no reforzados se registró un módulo elástico promedio de 942 MPa, mientras que en los elementos reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP fueron de 469 MPa y 735 MPa, respectivamente. Las correspondientes dispersiones fueron de 75%, 44% y 30. En la Gráfica 5-20 se presentan los valores registrados. Adicionalmente, de la Gráfica 5-21 a la Gráfica 5-23 se presentan las curvas esfuerzo-deformación de los elementos ensayados.



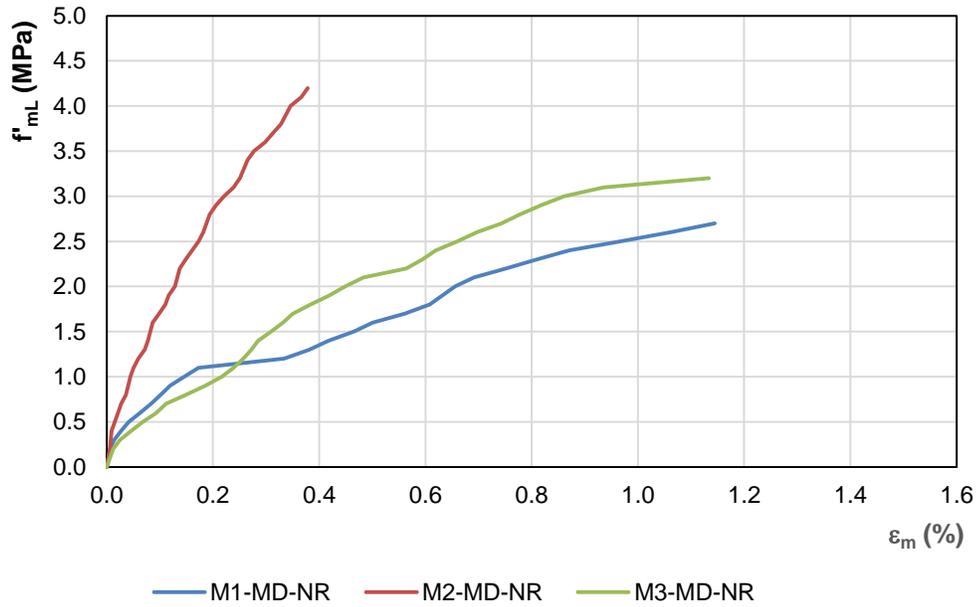
Fotografía 5-27 Ensayo de resistencia a compresión y módulo elástico, en murete mediano

Fuente: El autor



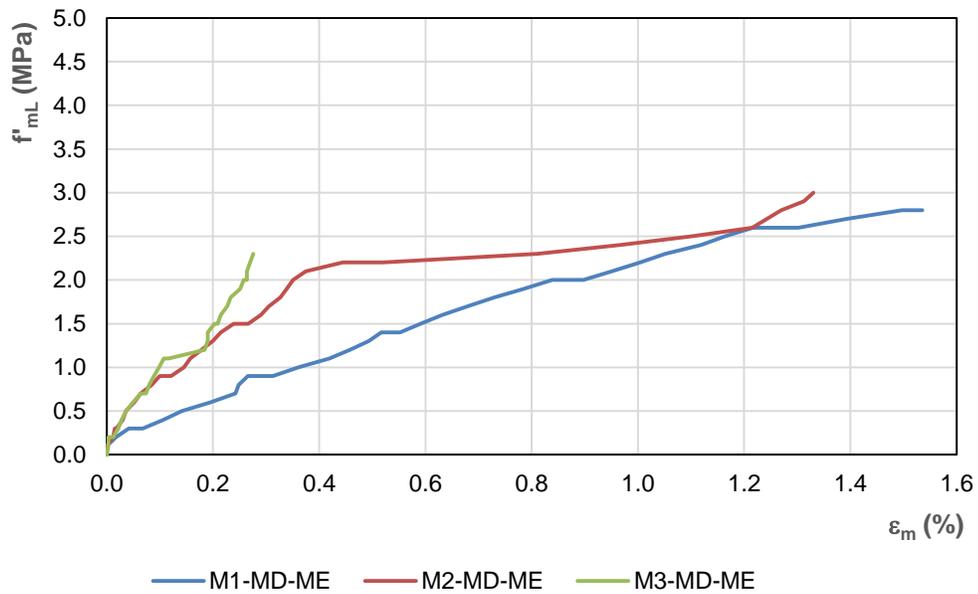
Gráfica 5-20 Módulo elástico de muretes mediano

Fuente: El autor



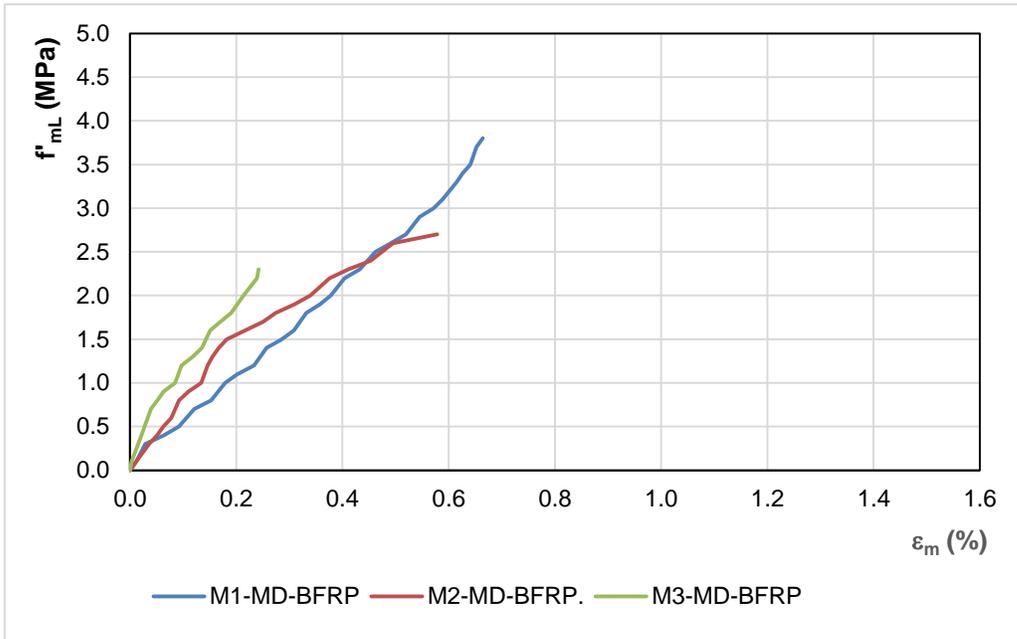
Gráfica 5-21 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados

Fuente: El autor



Gráfica 5-22 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada

Fuente: El autor



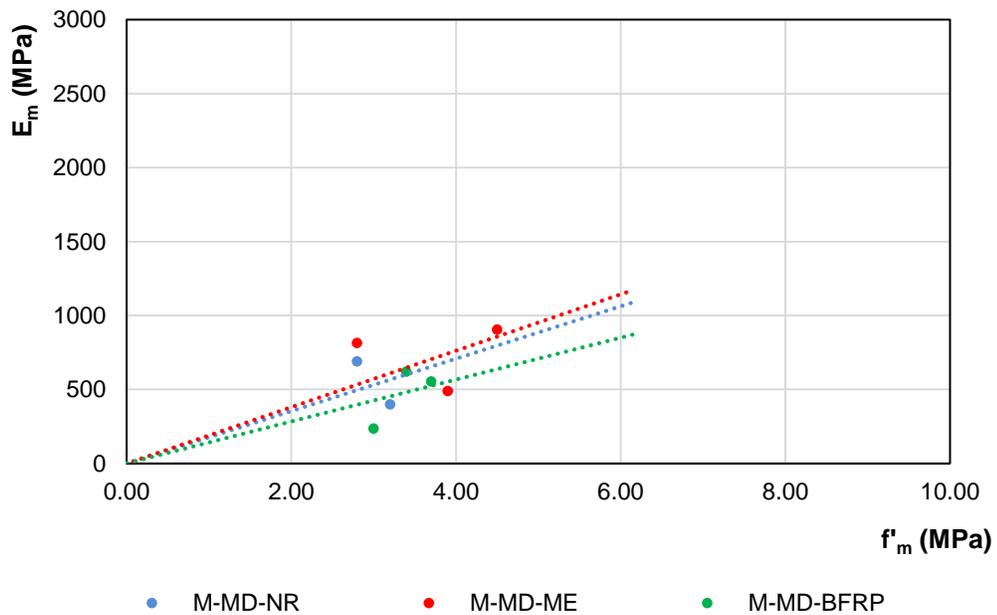
Gráfica 5-23 Curvas esfuerzo-deformación en muretes medianos, elaborados con mortero adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP

Fuente: El autor

De acuerdo con lo anterior, el módulo elástico de los elementos sin reforzar resultó mayor 101%, con respecto a los especímenes reforzados con malla electrosoldada, y 28% superior que los ejemplares reforzados con barras de GFRP. Sin embargo, cabe destacar que la dispersión registrada en los muretes no reforzados es bastante alta. Además, al observar la Gráfica 5-21, se aprecia que la muestra M1-MD-NR presentó una rigidez considerable, en comparación con las otras muestras. Por ende, si no se toma en cuenta el resultado de dicha muestra, se obtendría un módulo promedio de 543 MPa y una dispersión de 37.8%. De este modo, el módulo elástico sería superior 16% al determinado en las muestras reforzadas con malla, y 26% menor al obtenido en los elementos reforzados con barras. A pesar de las dispersiones obtenidas, aparentemente las alternativas de refuerzo planteadas en el presente estudio no aportaron rigidez a la mampostería con la configuración tipo tizón. Además, debe considerarse que se desconoce el estado de esfuerzos al que estuvieron sometidas las unidades arcilla patrimonial, utilizadas para la construcción de las probetas, lo cual pudo influir drásticamente en los resultados obtenidos.

5.8.7 Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico en muretes medianos

De acuerdo con los resultados obtenidos en las muestras de estudio, se estimó una correlación lineal entre la resistencia a compresión (f'_m) y el módulo elástico (E_m). En este caso tampoco se evaluó el coeficiente de determinación (R^2). En la Gráfica 5-24 se presenta la correlación de los datos y las líneas de tendencia por cada tipo de murete. Adicional a lo anterior, en la Tabla 5-11 se presentan las ecuaciones estimadas.



Gráfica 5-24 Correlación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico en la mampostería

Fuente: El autor

Tabla 5-11 Correlaciones entre f'_m y E_m , en muretes medianos

Mampostería	Correlación entre f'_m y E_m
M-MD-NR	$E_m = 177f'_m$
M-MD-ME	$E_m = 190f'_m$
M-MD-BFRP	$E_m = 142f'_m$

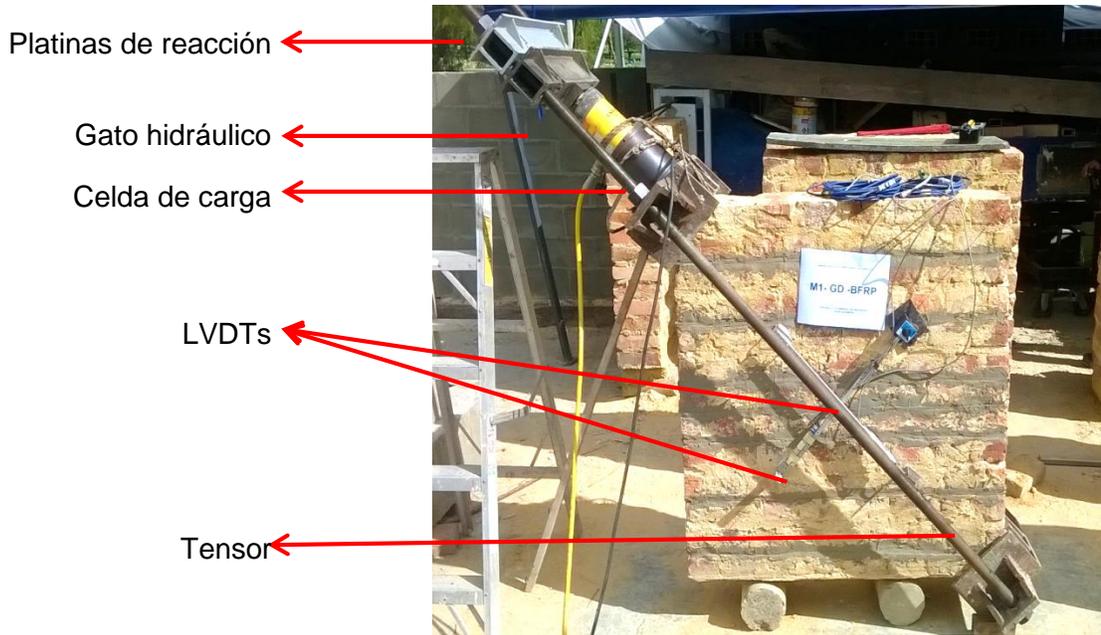
Fuente: El autor

De acuerdo con lo anterior, se observa que los valores estimados son menores entre 75% y 81%, con relación al especificado en la NSR-10 para mampostería con juntas de mortero de cemento. De igual manera, para el mismo tipo de muretes construidos con mortero de cal, Torres et al. (2016) encontraron una relación $E_m = 81f'_m$, por lo que se aprecia un aumento en la rigidez de los elementos al utilizar mortero de cal adicionado con metacaolín.

5.8.8 Compresión diagonal en muretes grandes

Esta prueba se realizó en nueve muretes grandes; tres de ellos no tenían refuerzo (M-GD-NR), tres se encontraban reforzados en una cara con malla electrosoldada (M-GD-ME), mientras que los restantes se reforzaron con barras de GFRP embebidas en las juntas de mortero (M-GD-BFRP). De igual manera, el ensayo se ejecutó de acuerdo con los requisitos estipulados en la norma ASTM E519.

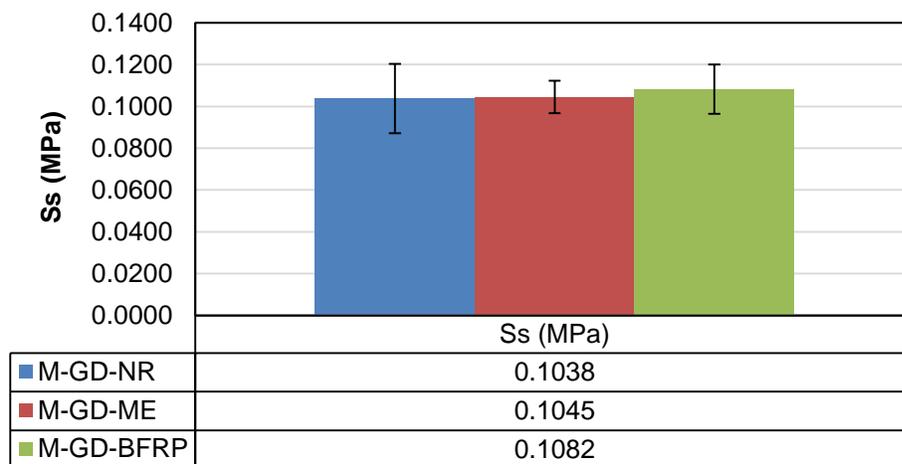
Básicamente, el ensayo consistió en aplicar carga en una de las diagonales del elemento, utilizando un gato hidráulico. Para esto, se colocaron unos aditamentos especiales en las esquinas del murete, conectados entre sí por medio de tensores de acero. De esta forma, la diagonal paralela a la carga se veía sometida a compresión, mientras que la perpendicular se encontraba a tensión. Las fuerzas fueron registradas con una celda de carga, de diez toneladas de capacidad, conectada a un equipo de adquisición de datos. Adicional a esto, para calcular el módulo de rigidez a corte, la norma de referencia indica la necesidad de registrar las deformaciones en las diagonales de la muestra, por lo que se utilizaron transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs), los cuales se encontraban conectados al equipo de adquisición de datos. En la Fotografía 5-28 se presenta el montaje de la prueba.



Fotografía 5-28 Ensayo de compresión diagonal en muretes grandes

Fuente: El autor

En los muretes no reforzados, el esfuerzo cortante promedio en el área neta fue de 0.1038 MPa, con una dispersión de 16%. Para el caso de los especímenes reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP, se registraron valores de 0.1048 MPa y 0.1082 MPa. Las respectivas variaciones fueron de 7% y 11%. En la Gráfica 5-25 se presentan los valores obtenidos en la prueba.



Gráfica 5-25 Esfuerzo cortante máximo, obtenido en pruebas de compresión diagonal

Fuente: El autor

172 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

De lo anterior se observa que la resistencia máxima a corte en los muretes no reforzados fue inferior alrededor de 1%, con relación a los elementos reforzados con malla electrosoldada. Con respecto a los especímenes con barras de GFRP, el valor fue menor 4%. Esto indica que el reforzamiento no mejoró la resistencia al corte de la mampostería. Tal fenómeno, puede atribuirse a la diferencia en la calidad de los ladrillos, ya que se desconocen las condiciones de servicio a las que estuvieron sujetos durante su vida útil. Además, también influye la falta de estándares en los procesos de producción de unidades cerámicas, antes de la creación de normas técnicas.

Por otro lado, el mecanismo de falla en los muretes no reforzados fue falla combinada en la junta y algunas unidades cerámicas (ver Fotografía 5-29). Adicionalmente, estos presentaron una recuperación “leve” al momento de la descarga. Adicional a lo anterior, en la primera muestra se registró falla por adherencia en una junta horizontal (ver Fotografía 5-30). En el segundo murete se localizó un segundo plano de falla cercano al punto de aplicación de la carga (ver Fotografía 5-31).



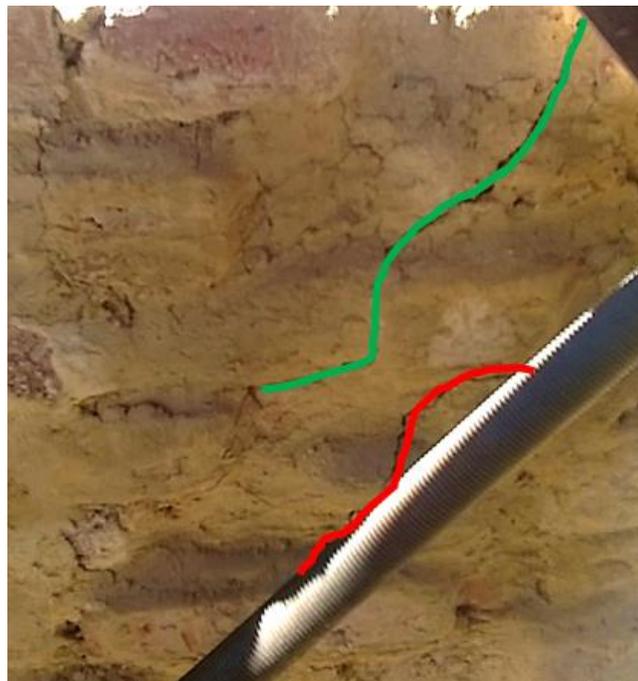
Fotografía 5-29 Mecanismo de falla en muretes no reforzados, sometidos a compresión diagonal

Fuente: El autor



Fotografía 5-30 Falla por adherencia en junta horizontal en murete no reforzado, durante la prueba de compresión diagonal

Fuente: El autor



Fotografía 5-31 Registro de dos planos de falla diagonales en murete no reforzado, sometido a compresión diagonal

Fuente: El autor

En los elementos reforzados con malla electrosoldada, se observó un mecanismo de falla combinado en la junta de la mampostería y las unidades cerámicas (ver Fotografía 5-32), acompañado de la aparición de fisuras en el mortero de revoque (ver Fotografía 5-33). Sin embargo, en uno de los especímenes se presentó falla solamente en la junta. Adicional a esto, en una de las muestras se observó desprendimiento del revoque de la mampostería (ver Fotografía 5-34). A pesar de esto, al examinar el refuerzo, se apreció que la malla no falló y los anclajes se mantuvieron intactos. En general, se mantuvo la integridad estructural de la mampostería y al momento de descargar los elementos, recuperaron buena parte de su deformación. No obstante, al momento de la falla se observó una tendencia de las muestras a ladearse hacia las caras reforzadas. Este fenómeno también fue observado por Turco et al. (2005) en elementos reforzados con barras de GFRP. Tal fenómeno, puede deberse a la distribución de esfuerzos que se presenta en la estructura, por lo que la malla puede comenzar a tomar deformaciones una vez se ha presentado la fisura del conjunto de mampostería.



Fotografía 5-32 Mecanismo de falla en muretes reforzados con malla electrosoldada, sometidos a compresión diagonal

Fuente: El autor



Fotografía 5-33 Fisuración del mortero de revoque, durante el ensayo de compresión diagonal en murete reforzado con malla electrosoldada

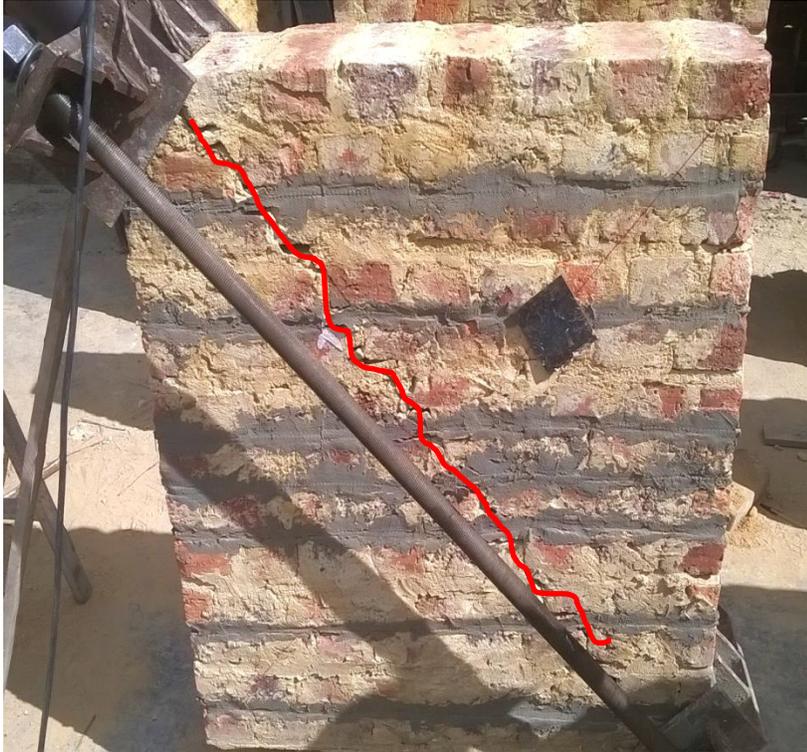
Fuente: El autor



Fotografía 5-34 Desprendimiento del mortero de revoque de la mampostería

Fuente: El autor

Con respecto a los elementos reforzados con barras de GFRP en las juntas, el mecanismo general de falla fue combinado en la junta y las unidades de mampostería (ver Fotografía 5-35). Solamente una de las muestras presentó falla en la junta. Asimismo, en el plano de falla, las barras de GFRP se pandearon por flexión (ver Fotografía 5-36), debido a que la diagonal perpendicular a la carga aplicada se tensionaba. A pesar de esto, después de descargar los muretes, el refuerzo recuperó su forma original. De este modo, se observó integridad estructural y buena adherencia entre el epóxico, las barras y la mampostería. En este caso también se observó un ladeo leve hacia la cara reforzada, coincidiendo con lo evidenciado en los ejemplares reforzados con malla electrosoldada, y por Turco et al. (2005).



Fotografía 5-35 Mecanismo de falla en muretes reforzados con barras de GFRP, sometidos a compresión diagonal

Fuente: El autor



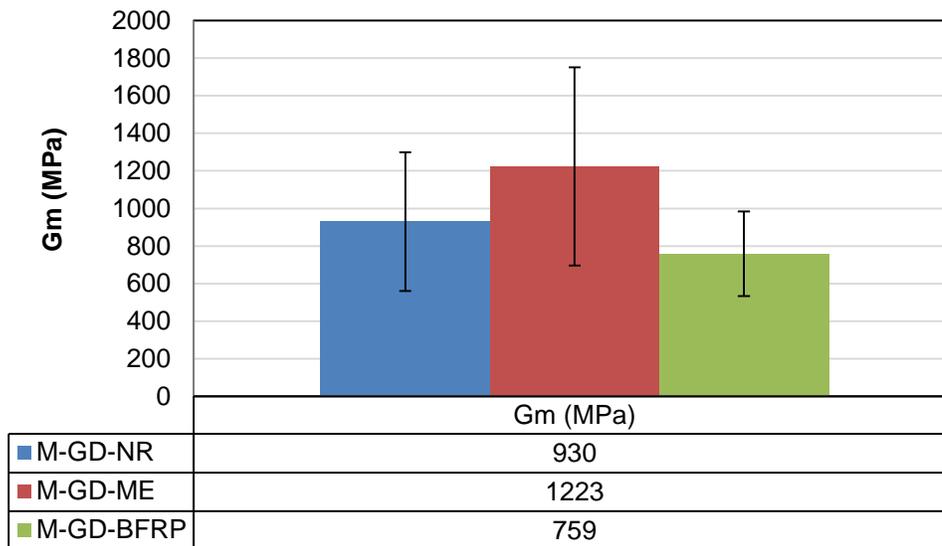
Fotografía 5-36 Barra de GFRP flectada en una de las juntas, después del ensayo de compresión diagonal

Fuente: El autor

Por otro lado, el módulo de rigidez a cortante (G_m) se estimó utilizando las curvas esfuerzo de corte-deformación angular. Debido a que la norma ASTM E519 no especifica un rango de esfuerzos para determinar dicha propiedad, se tomó como referencia el análisis realizado por Borri et al. (2010), quienes calcularon dicha propiedad como una recta secante a un tercio de la resistencia máxima por corte. Con base en esto, el módulo se calculó por medio de la siguiente expresión:

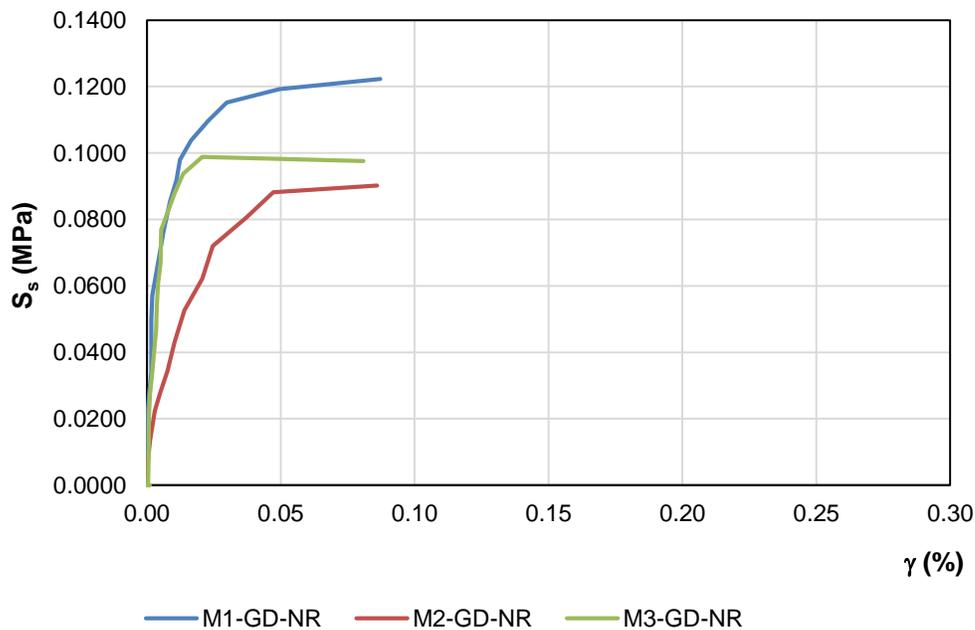
$$G_m = \frac{S_s \text{ máx}}{3\gamma_{1/3}} \quad \text{Ecuación 5-5}$$

Por lo tanto, el módulo de rigidez promedio en las muestras sin refuerzo fue de 930 MPa, con una variación de 40%. Para los especímenes reforzados con malla electrosoldada y barras de GFRP, los valores fueron de 1223 MPa y 759 MPa, respectivamente. Las correspondientes dispersiones fueron de 43% y 30%. Adicional a lo anterior, en dos muretes, uno reforzado con malla y el otro con barras, no fue posible medir las deformaciones por imprevistos en el montaje de la prueba. En la Gráfica 5-26, mientras que de la Gráfica 5-27 a la Gráfica 5-29 se presentan las curvas esfuerzo-deformación a corte de los elementos estudiados.



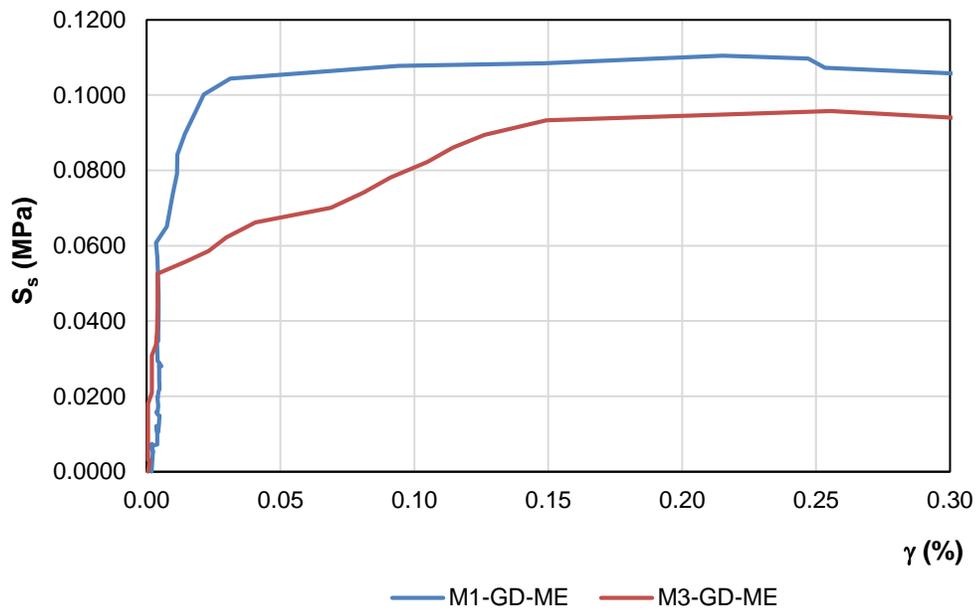
Gráfica 5-26 Módulo de rigidez a cortante en muretes grandes

Fuente: El autor



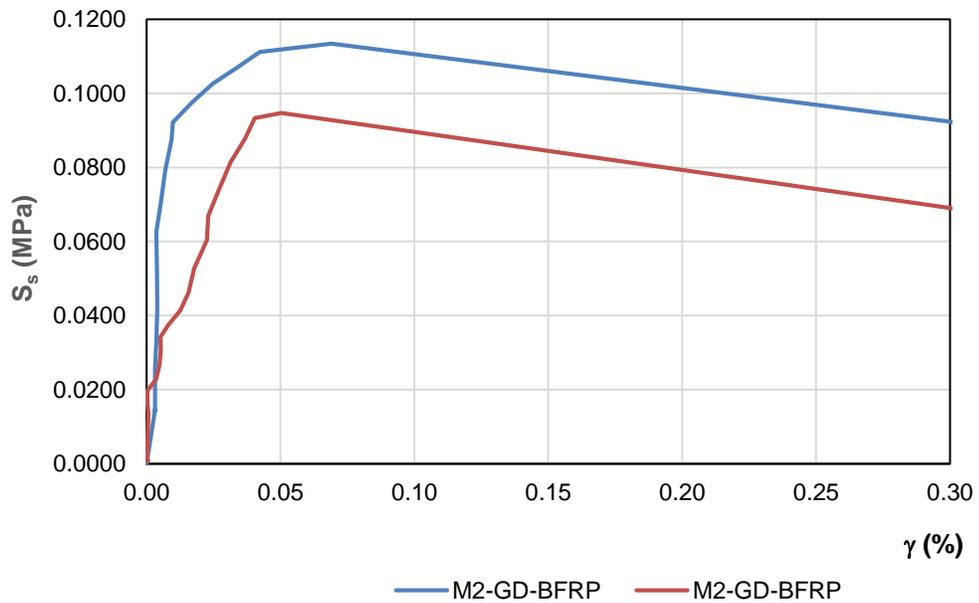
Gráfica 5-27 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes no reforzados

Fuente: El autor



Gráfica 5-28 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes reforzados con malla electrosoldada

Fuente: El autor



Gráfica 5-29 Curvas esfuerzo deformación a corte, en muretes grandes reforzados con barras de GFRP

Fuente: El autor

De acuerdo con lo anterior, se observa que el módulo de rigidez de la mampostería no reforzada es 24% inferior, con relación a los sistemas reforzados con malla electrosoldada. De igual manera, resulta inconsistente que el valor registrado en los especímenes no reforzados resultara mayor un 23% con relación al evaluado en los ejemplares reforzados con barras de GFRP. Esto se atribuye a las dispersiones registradas en los valores, lo cual limita una estimación propia sobre la propiedad en cuestión. Además, se recalca la influencia de las unidades de mampostería, ya que su variación en calidad y resistencia dispersa los resultados de las pruebas ejecutadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante la investigación, se presentan las siguientes conclusiones:

- En términos generales, las unidades recocidas presentaron menor absorción y mayores resistencias a compresión y flexión, con respecto a las unidades rosadas. De este modo, existe la posibilidad de que las propiedades mecánicas de la mampostería aumenten si se incrementa su porcentaje en la mampostería.
- Las resistencias determinadas en los morteros adicionados con metacaolín, curados en cámara de humedad y temperatura, en general triplicaron las registradas en las mezclas de cal y arena, curadas en las mismas condiciones.
- Los morteros adicionados con metacaolín presentaron desarrollo de resistencia superior, en comparación con las mezclas de cal y arena. Por ende, se infiere que al adicionar metacaolín en morteros de cal, la tasa de endurecimiento será superior, alcanzando altas resistencias tempranas.
- Los morteros adicionados con polvo de ladrillo, curados en cámara de humedad y temperatura, presentaron resistencias ligeramente superiores a las encontradas en la mezcla de cal y arena, bajo las mismas condiciones de curado.
- Los morteros adicionados, curados en cámara de carbonatación, presentaron resistencias menores con relación a la mezcla de cal y arena. Esto puede deberse a que los componentes de las adiciones reaccionaron con el hidróxido de calcio, presente en la cal, generando así silicatos y aluminatos de calcio. En

consecuencia, no toda la portlandita de la cal reaccionó con el dióxido de carbono para formar calcita.

- En los morteros adicionados curados en la cámara de humedad y temperatura, no se registraron caídas de resistencia, como la observada en las muestras de cal y arena. Esto podría indicar que las adiciones ayudaron a reducir microfisuras internas por retracción.
- El avance del frente de carbonatación resultó mayor en los morteros adicionados que en la mezcla de cal y arena. Sin embargo, después de cierto tiempo se presenta una reducción en la tasa de hidratación de la mezcla, lo cual puede reducir las tasas de carbonatación.
- Los morteros de cal presentan una tasa de carbonatación inicial alta, la cual se reduce después de cierto tiempo. Esto quizás se pueda relacionar con algún proceso químico que se presente en la matriz cementicia o con la hidratación de esta.
- En los morteros curados en el ambiente, las resistencias registradas se encontraron alrededor de la mitad de las evaluadas en las mezclas curadas en la cámara de humedad y temperatura. Posiblemente esto se atribuye a las variaciones de la temperatura y la humedad relativa del ambiente, por lo que puede presentarse pérdida de agua en los morteros, afectando así la hidratación de la matriz cementicia. De esta manera, la resistencia a compresión se ve reducida. Adicionalmente, por dichas variaciones también pueden presentarse microfisuras internas que también afectan la resistencia.
- En los muretes de unidad y media se observó un aumento en la resistencia a compresión, en los elementos carbonatados, con respecto a los especímenes curados bajo condiciones ambientales. Esto evidencia la influencia de la carbonatación de las mezclas en la ganancia de resistencia de la mampostería.

-
- En los muretes de unidad y media construidos con mortero adicionado con metacaolín, se observó un incremento en la resistencia a compresión con las alternativas de refuerzo planteadas.
 - En los especímenes de mampostería de unidad y media, fabricados con morteros de cal y arena y adicionado con metacaolín, la resistencia a compresión resultó similar, lo cual puede indicar que la baja calidad de algunas unidades cerámicas lleva a la falla del murete, independiente de la resistencia del mortero.
 - Al revisar la profundidad del frente de carbonatación en las juntas de los muretes, no se encontró concordancia con los valores evaluados utilizando las constantes de carbonatación natural estimadas. Probablemente esto se debe a la variación de dicha constante a medida que los componentes de las mezclas se hidrataban.
 - El módulo elástico registrado en los muretes de unidad y media carbonatados y fabricados con mezcla de cal, resultó mayor al determinado en los elementos curados en condiciones ambientales. Esto permite inferir que la carbonatación también influye en el desarrollo de la rigidez de la mampostería sentada en mortero de cal.
 - El uso de barras de GFRP aparentemente aumentó de forma considerable la rigidez de los muretes de unidad y media. A pesar de esto, el plano de falla que se generó en la cara reforzada posiblemente puede generar el colapso de esta, reduciendo la capacidad de los elementos.
 - Al evaluar la resistencia a compresión en los muretes medianos, básicamente no se evidenció ninguna mejora en los sistemas reforzados. Este puede atribuirse a la falla de los ladrillos. Además, como la calidad de estos es variable, la probabilidad de falla en las unidades aumenta, impidiendo una distribución de esfuerzos que permita el aporte del refuerzo.
 - El módulo elástico registrado en los muretes medianos reforzados no presentó indicios de aumentar la rigidez de la mampostería. Al igual que en el caso de la resistencia a compresión, este fenómeno y la dispersión de los valores se atribuye a la calidad de las unidades de mampostería.

- De las curvas esfuerzo-deformación a corte, se evidenció que la mampostería con entramado tipo tizón resultó bastante rígida. Sin embargo, una vez los muretes alcanzaban su resistencia máxima, la falla resultaba instantánea, aumentando de forma considerable las deformaciones de los especímenes de ensayo.
- El módulo de rigidez a cortante evidencia ser muy sensible a cualquier cambio en las condiciones de resistencia y deformación de la mampostería.

Los resultados obtenidos en esta investigación son para uso académico. De ser usados como criterio en la práctica profesional, es bajo la responsabilidad del profesional calificado. De igual manera, no se pretende generar controversia con respecto a las marcas de los materiales, debido a que muchos de ellos fueron donados por empresas que apoyan la investigación científica en la Escuela Colombiana de Ingeniería. Si por alguna razón se trabaja con otros materiales, incluso con los mismos, se deben realizar los ensayos pertinentes para garantizar resultados satisfactorios.

6.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados y las conclusiones del presente estudio, a continuación, se numeran una serie de recomendaciones:

- Dado que existen diferentes tipos de cales hidráulicas, se recomienda evaluar el desarrollo de la resistencia de morteros curados bajo el agua.
- Se recomienda evaluar la actividad puzolánica del polvo de ladrillo y verificar si se requiere algún tratamiento mecánico o térmico adicional.
- Debido a que la tasa de carbonatación de los morteros es variable, se plantea medir la profundidad del frente de carbonatación en condiciones controladas y atmosféricas, a diferentes edades. Con el fin de determinar una expresión que permita evaluar la relación existente entre las constantes de carbonatación acelerada y natural.

-
- Para aumentar el conocimiento del comportamiento de los morteros de cal en Colombia, se recomienda realizar pruebas de retracción en las mezclas y ensayos de adherencia con unidades de mampostería.
 - Ya que la calidad de los ladrillos patrimoniales es variable y parece incrementar las variaciones de los resultados, se sugiere evaluar las propiedades mecánicas de mampostería sentada en morteros de cal, utilizando ladrillos que se fabriquen bajo estándares de producción con las propiedades equivalentes de la mampostería de la época.
 - Como los morteros de cal pierden agua por un período prolongado de tiempo, se recomienda proteger la mampostería para evitar pérdidas de humedad en las mezclas.
 - Al momento de construir elementos de mampostería, debe tenerse cuidado al momento de asentar las unidades cerámicas en las juntas de mortero, ya que por descuido pueden quedar vacíos en estas, e incidir de forma perjudicial en las propiedades mecánicas.
 - Se recomienda construir elementos de mampostería a escala para su caracterización.
 - Al realizar ensayos de compresión axial y compresión diagonal en elementos de mampostería sentada en morteros de cal, se sugiere emplear ciclos de carga y descarga que permitan evaluar las pérdidas de rigidez en los elementos, y así evaluar la ductilidad que aportan las alternativas de refuerzo.
 - El rozamiento que se presenta entre el mortero y los ladrillos puede tener efectos en la resistencia de la mampostería, por lo que se recomienda construir muretes con entramados diferentes al tizón, y así, poder hacer una comparación con los resultados obtenidos.
 - Con base al estudio de Bellini et al. (2017), se propone precargar los elementos de mampostería al momento de reforzarlos, con el objetivo de simular las condiciones de una edificación real.

6.3 Comentario final

Las alternativas de reforzamiento utilizadas en el presente estudio, aparentemente no son funcionales para el tipo de mampostería de la investigación. Sin embargo, se hace un llamado a los profesionales a realizar diagnósticos de patología y evaluaciones de la capacidad portante de las edificaciones a intervenir, **maneándolas como casos únicos de estudio.**

A. Anexo A: Composición química de la cal

188 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con maderos patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
VICERRECTORÍA DE SEDE
DIRECCIÓN DE LABORATORIOS
LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., Junio 21 de 2016

[XRF-148-16]

Señores

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Atn. Nancy Torres Castellanos

Docente, Departamento de Ingeniería Civil

Carrera 45 No. 205 - 59 (Autopista Norte)

Teléfono: 3002141714

Bogotá

Correo: nancy.torres@escuelaing.edu.co

Respetados Señores:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de seis (06) muestras solidas (Diversos materiales), remitidas por ustedes y codificadas por este laboratorio como:

- | | | |
|-----------------|---------------------------|-----------|
| • XRF-5212 M- 1 | Cal La Concordia | -Escuela- |
| • XRF-5213 M- 2 | Ceniza Volante | -Escuela- |
| • XRF-5214 M- 3 | Cemento Concretero | -Escuela- |
| • XRF-5215 M- 4 | Ladrillo Casa Abadía | -Escuela- |
| • XRF-5216 M- 5 | Ladrillo Casa Tito | -Escuela- |
| • XRF-5217 M- 6 | Ladrillo Plaza de Mercado | -Escuela- |

Cómo las muestras poseían un tamaño de partícula demasiado gruesa, esta se redujo con un molino de bolas de ágata; después se pasaron por un tamiz malla 100 μ .

Las muestras fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente las muestras en polvo se mezclaron con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizadas por agitación, llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando seis pastillas prensadas de 37mm de diámetro que fueron medidas en la aplicación SEMIQ-2016.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW - 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCIÁZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA DIRECCIÓN DE LABORATORIOS SEDE BOGOTÁ, 2/3
 LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X, INFORME No. XRF-148-16.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

Los resultados obtenidos en forma de elementos y de compuestos, se transcriben a continuación.

Elemento y/o Compuesto	XRF-5212 M-1 Cal La Concordia -Escuela- (% en peso)	Elemento y/o Compuesto	XRF-5213 M-2 Ceniza Volante - Escuela - (% en peso)	Elemento y/o Compuesto	XRF-5214 M-3 Cemento Concretero - Escuela - (% en peso)
CaO	86,834	SiO ₂	62,750	CaO	61,015
SiO ₂	6,666	Al ₂ O ₃	24,392	SiO ₂	20,906
Al ₂ O ₃	2,355	Fe ₂ O ₃	5,028	SO ₃	5,868
Fe ₂ O ₃	1,876	CaO	1,714	Al ₂ O ₃	4,783
MgO	0,877	K ₂ O	1,431	Fe ₂ O ₃	3,632
SO ₃	0,600	SO ₃	1,301	K ₂ O	1,047
K ₂ O	0,240	TiO ₂	1,147	MgO	0,911
TiO ₂	0,215	P ₂ O ₅	0,790	Na ₂ O	0,680
P ₂ O ₅	0,156	MgO	0,588	TiO ₂	0,311
SrO	0,086	Na ₂ O	0,425	P ₂ O ₅	0,298
MnO	0,057	Ba	0,121	Mn ₂ O ₃	0,271
ZnO	0,025	Sr	0,091	Ba	0,087
Cl	0,012	Ce	0,044	SrO	0,084
		Zr	0,036	Cl	0,070
		MnO	0,027	ZnO	0,021
		V	0,019	Pb	0,006
		Zn	0,019	Rb	0,005
		Ni	0,015	Y	0,005
		Pb	0,013		
		Cr	0,012		
		Co	0,011		
		Cu	0,009		
		Rb	0,009		
		Y	0,007		
		Ga	0,004		

*Los valores en negrilla son informativos

188 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA DIRECCIÓN DE LABORATORIOS SEDE BOGOTÁ, 3/3
LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X, INFORME No. XRF-148-16.

Elemento y/o Compuesto	XRF-5215 M-4 Ladrillo Casa Abadía -Escuela- (% en peso)
SiO ₂	65,951
Al ₂ O ₃	20,009
Fe ₂ O ₃	5,896
K ₂ O	1,407
TiO ₂	0,905
MgO	0,471
CaO	0,383
Na ₂ O	0,268
P ₂ O ₅	0,142
SO ₃	0,110
Ba	0,086
Ce	0,031
Zr	0,026
V	0,024
MnO	0,023
Zn	0,013
Sr	0,010
Cr	0,009
Co	0,008
Rb	0,008
Ni	0,007
Cu	0,004
Pb	0,004
Y	0,003

Elemento y/o Compuesto	XRF-5216 M-5 Ladrillo Casa Tito - Escuela - (% en peso)
SiO ₂	67,056
Al ₂ O ₃	16,531
Fe ₂ O ₃	4,640
CaO	1,363
K ₂ O	1,279
TiO ₂	0,840
Na ₂ O	0,638
MgO	0,563
Cl	0,537
P ₂ O ₅	0,259
SO ₃	0,122
Ba	0,090
MnO	0,044
Zr	0,029
V	0,028
Ce	0,024
Zn	0,017
Sr	0,012
Cr	0,010
Cu	0,008
Rb	0,004
Y	0,004

Elemento y/o Compuesto	XRF-5217 M-6 Ladrillo Plaza de mercado - Escuela - (% en peso)
SiO ₂	65,180
Al ₂ O ₃	14,054
Fe ₂ O ₃	6,551
K ₂ O	1,331
TiO ₂	0,869
CaO	0,710
MgO	0,614
Na ₂ O	0,456
P ₂ O ₅	0,112
SO ₃	0,099
Ba	0,093
MnO	0,049
Zr	0,028
Ce	0,028
V	0,021
Cu	0,020
Zn	0,019
Cl	0,018
Cr	0,011
Co	0,010
Ni	0,008
Rb	0,008
Sr	0,008
Y	0,004

*Los valores en negrilla son informativos

Nota: El resultado analítico presente, corresponde exclusivamente a las muestras recibidas y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 45 días posteriores a la entrega de este informe. La contramuestra y los residuos de preparación serán almacenados por un periodo de 60 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

Nota de confidencialidad: El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Cordialmente,


Ing. WILSON ROMERO M.
Profesional de Apoyo

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1°, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co

B. Anexo B: Caracterización de la arena

192 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



Bogotá D.C., Junio 10 de 2016

Ingeniera
NANCY TORRES CASTELLANOS
Jefe del Laboratorio de Estructuras y Materiales
Escuela Colombiana de Ingeniería
Ciudad

Anexo a la presente estamos entregando el informe IG – 024 – 16, correspondiente a los resultados de los ensayos de Granulometría, Densidad, Porcentaje de Absorción y Masa Unitaria, solicitados por usted al Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, el pasado 27 de Mayo de 2016.

El material recibido y sometido a ensayos, de acuerdo con la identificación dada por usted, fue el siguiente:

- Muestra N° 1: Arena de Peña T1
- Muestra N° 2: Arena de Peña T2

Atenderemos con gusto cualquier aclaración al respecto.

Ing. Sandra Ximena Campagnoli Martínez
Laboratorio de Suelos y Pavimentos

Ing. Dairo Stevens Puentes Penagos
Laboratorio de Suelos y Pavimentos



IG - 024-16
Hoja 1 de 4

1. MUESTRA N° 1
Arena de Peña T1

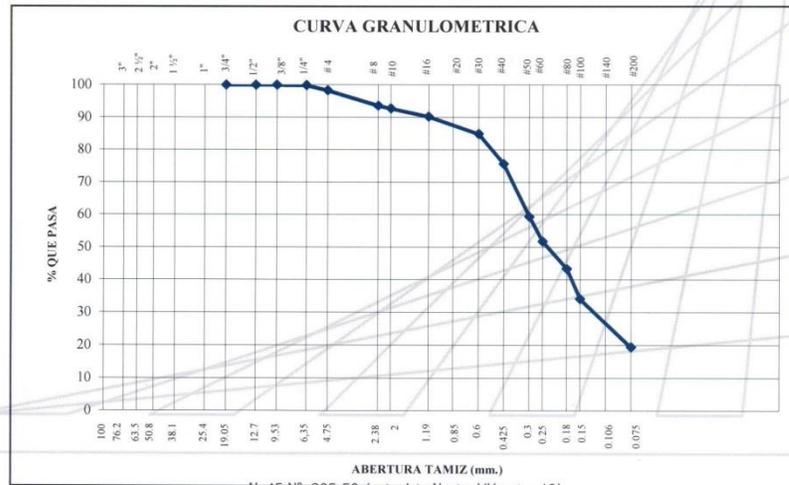
1.1 GRANULOMETRIA
Norma INV - E 213



Peso material sucio y seco (g) = 2010,0 Peso recipiente (g) = 0,0
Peso material retenido seco (g) = 1646,6 Peso material pasa No. 200 (g) = 363,4

TAMIZ	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO (corregido)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
3/8"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/4"	3,4	3,4	0,2	0,2	100
N° 4	30,4	30,4	1,5	1,7	98
N° 8	94,8	94,8	4,7	6,4	94
N° 10	17,7	17,7	0,9	7,3	93
N° 16	50,2	50,2	2,5	9,8	90
N° 30	106,8	106,8	5,3	15,1	85
N° 40	186,8	186,8	9,3	24,4	76
N° 50	324,2	324,2	16,1	40,5	59
N° 60	153,9	153,9	7,7	48,2	52
N° 80	167,9	167,9	8,4	56,5	43
No. 100	186,6	186,6	9,3	65,8	34
No. 200	295,7	295,7	14,7	80,5	19,5
Fondo	25,8	25,8	19,4	99,9	0

Suma pesos retenidos (g) = 1644,2



At 45 N° 205-59 (autopista Norte, kilómetro 13)

PBX: (571) 668 3600 • Fax: 676 2340 • Bogotá, D.C., Colombia
www.escuelaing.edu.co



IG - 024-16
Hoja 2 de 4

1.2 PESO UNITARIO
Norma INV - E 217 - 13

Procedimiento:

Punzonamiento con barra sobre muestra representativa.

Resultado:

Densidad Bulk Suelta por Paladas = 1470 kg/m³
Densidad Bulk Compactada por Apisonado = 1610 kg/m³

1.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN
Norma INV - E 222 - 13

Resultados:

Densidad Relativa

Densidad Relativa Secada al Horno 2,54 g/cm³
Densidad Relativa en Condición SSS 2,59 g/cm³
Densidad Relativa Aparente 2,68 g/cm³

Densidad

Densidad en Condición Seca al Horno 2540 Kg/m³
Densidad en Condición SSS 2590 Kg/m³
Densidad Aparente 2680 Kg/m³

Absorción 2,1 %

Nota: Condición SSS se refiere a saturada y superficialmente seca





IG - 024-16
Hoja 3 de 4

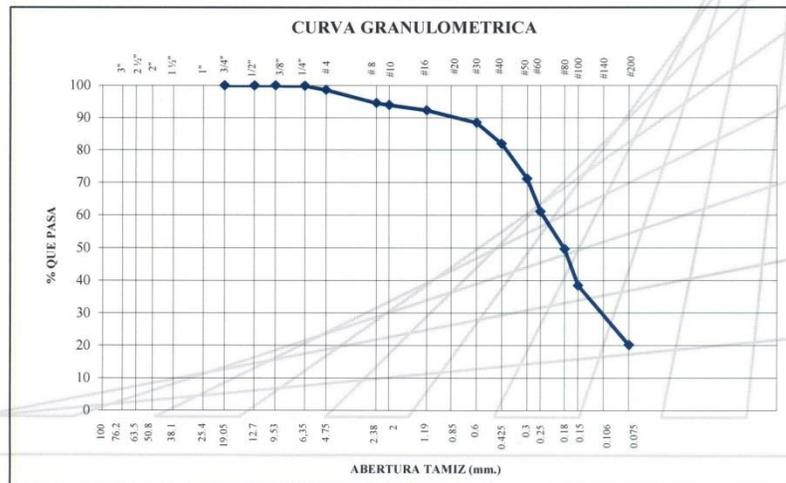
2. MUESTRA N° 2
Arena de Peña T2

2.1 GRANULOMETRIA
Norma INV - E 213



Peso material sucio y seco (g) = 2058,0 Peso recipiente (g) = 0,0
Peso material retenido seco (g) = 1684,8 Peso material pasa No. 200 (g) = 373,2

TAMIZ	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO (corregido)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
3/8"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/4"	3,3	3,3	0,2	0,2	100
N° 4	24,8	24,8	1,2	1,4	99
N° 8	84,6	84,6	4,1	5,5	95
N° 10	11,5	11,5	0,6	6,0	94
N° 16	34,1	34,1	1,7	7,7	92
N° 30	79,0	79,0	3,8	11,5	88
N° 40	133,3	133,3	6,5	18,0	82
N° 50	221,7	221,7	10,8	28,8	71
N° 60	207,5	207,5	10,1	38,9	61
N° 80	237,3	237,3	11,5	50,4	50
No. 100	228,7	228,7	11,1	61,5	38
No. 200	376,2	376,2	18,3	79,8	20,2
Fondo	41,4	41,4	20,1	99,9	0
Suma pesos retenidos (g) =		1683,4			



Ak 45 N° 205-59 (autopista Norte, kilómetro 13)
PBX: (571) 668 3600 • Fax: 676 2340 • Bogotá, D.C., Colombia
www.escuelaing.edu.co



IG - 024-16
Hoja 4 de 4

2.2 PESO UNITARIO
Norma INV - E 217 - 13

Procedimiento:
Punzonamiento con barra sobre muestra representativa.

Resultado:
Densidad Bulk Suelta por Paladas = 1410 kg/m³
Densidad Bulk Compactada por Apisonado = 1580 kg/m³

2.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN
Norma INV - E 222 - 13

Resultados:

Densidad Relativa
Densidad Relativa Secada al Horno 2,56 g/cm³
Densidad Relativa en Condición SSS 2,60 g/cm³
Densidad Relativa Aparente 2,66 g/cm³

Densidad
Densidad en Condición Seca al Horno 2560 Kg/m³
Densidad en Condición SSS 2590 Kg/m³
Densidad Aparente 2650 Kg/m³

Absorción 1,4 %

Nota: Condición SSS se refiere a saturada y superficialmente seca



C. Anexo C: Composición química del metacaolín

198 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
VICERRECTORÍA DE SEDE
DIRECCIÓN DE LABORATORIOS
LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., febrero 22 de 2017

[XRF-024-17]

Señores
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
Atn. Nancy Torres Castellanos
Docente, Departamento de Ingeniería Civil
Carrera 45 No. 205 – 59 (Autopista Norte)
Teléfono: 3002141714
Bogotá
Correo: nancy.torres@escuelaing.edu.co

Respetados Señores:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de una (01) muestra sólida (Polvo gris), remitida por el estudiante Andrés Espitia y codificadas por este laboratorio como:

- XRF-5651 M -MK -ECI-

La muestra fue secada a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente la muestra en polvo se mezcló con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizada por agitación, llevada a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando una pastilla prensada de 37mm de diámetro que fue medida en la aplicación SEMIQ-2016.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW – 2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCIÁZAR, Piso 1°, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_celfbog@unal.edu.co

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA DIRECCIÓN DE LABORATORIOS SEDE BOGOTÁ, 2/2
 LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X, INFORME No. XRF-024-17.

Los resultados obtenidos en forma de elementos y de compuestos, se transcriben a continuación.

Elemento y/o Compuesto	XRF-5651 M-MK -ECI- (% en peso)
SiO ₂	58,04%
Al ₂ O ₃	38,14%
Fe ₂ O ₃	1,36%
TiO ₂	1,23%
K ₂ O	0,59%
MgO	0,20%
CaO	0,14%
Na ₂ O	0,07%
SO ₃	0,05%
Ba	0,05%
P ₂ O ₅	0,04%
Zr	0,04%
V	176 ppm
MnO	155 ppm
Cr	118 ppm
Ga	56 ppm
Cu	45 ppm
Zn	36 ppm
Rb	24 ppm
Sr	20 ppm
Nb	16 ppm
Y	15 ppm

*Los valores en negrilla son informativos

Nota: El resultado analítico presente, corresponde exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 30 días posteriores a la entrega de este informe. La contramuestra y los residuos de preparación serán almacenados por un periodo de 45 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

Nota de confidencialidad: El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Cordialmente,



ANA ELENA CONCHA P.
 Coordinadora

Carrera 30 No. 45 - 03
 EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1°, Oficina 114
 Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
 Bogotá, Colombia
 Correo electrónico: labfux_celfbog@unal.edu.co

D. Anexo D: Composición química y granulometría del polvo de ladrillo

202 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ
VICERRECTORÍA DE SEDE
DIRECCIÓN DE LABORATORIOS

LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., noviembre 20 de 2017

[XRF-228-17]

Señores

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Atn. Nancy Torres Castellanos

Docente, Departamento de Ingeniería Civil

Carrera 45 No. 205 - 59 (Autopista Norte)

Teléfono: 3002141714

Bogotá

Correo: nancy.torres@escuelaing.edu.co

Respetados Señores:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de una (01) muestra sólida en polvo (Ladrillo) aproximadamente 50g, remitida por el estudiante Andrés Espitia con el nombre de "PL" y codificada por este laboratorio como:

- XRF-6196 M- 1 PL -E.C.I.-

La muestra en polvo fue secada a 105°C por un período de 12 horas. Posteriormente mezclada con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizada por agitación, llevada a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando una pastilla prensada de 37mm de diámetro que fue medida en la aplicación SEMIQ-2017

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ 5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW - 2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 100ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

[Página 1 de 2]
Elaboró: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceiffbog@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos

Sede Bogotá | Vicerrectoría de Sede | Dirección de Laboratorios | Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X
Informe No. XRF-228-17

El resultado obtenido en forma de elementos y compuestos, se transcribe a continuación.

Universidad
Nacional
de Colombia

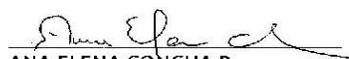
Elemento y/o Compuesto	XRF-6196 M- 1 -E.C.I.- (% en peso)
SiO ₂	67,27%
Al ₂ O ₃	23,13%
Fe ₂ O ₃	5,56%
K ₂ O	1,59%
TiO ₂	1,08%
MgO	0,43%
Na ₂ O	0,35%
CaO	0,17%
Ba	0,14%
P ₂ O ₅	0,08%
SO ₃	0,06%
V	0,03%
Zr	0,03%
Cr	0,02%
Zn	0,02%
Sr	0,02%
Cl	0,01%
MnO	0,01%
Rb	96 ppm
Pb	84 ppm
Y	32 ppm
Nb	16 ppm

*Los Valores en negrilla son informativos

Nota: El resultado analítico presente, corresponde exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. La modificación parcial o total del presente informe, invalida los resultados presentados en el mismo. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 30 días posteriores a la entrega de este informe. La contramuestra y los residuos de preparación serán almacenados por un periodo de 45 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

Nota de confidencialidad: El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Cordialmente,



ANA ELENA CONCHA P.
Profesora
Coordinadora laboratorio

[Página 2 de 2]
Elaboró: Wilson

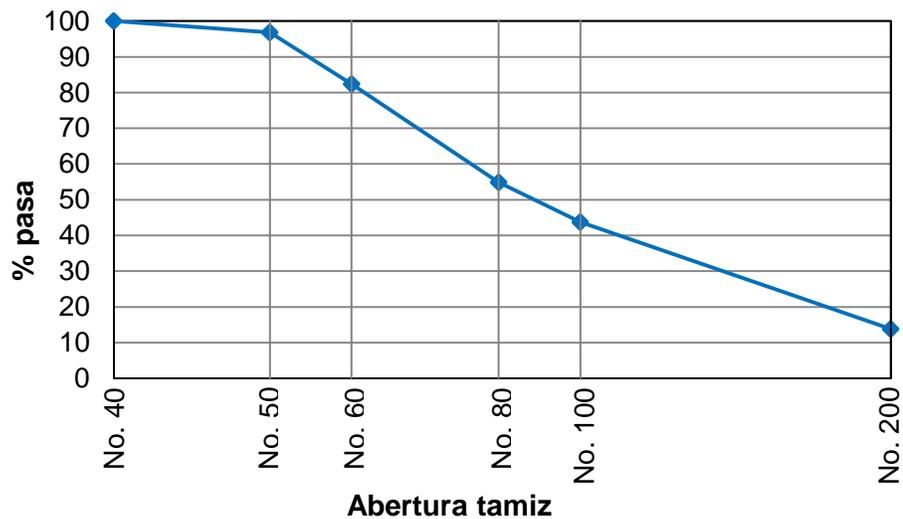
Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@una.edu.co

**Patrimonio
de todos
los colombianos**

Análisis granulométrico

Tamiz		Masa retenida (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
mm	pulg				
0.425	No. 40	0	0	0	100
0.300	No. 50	28.22	3	3	97
0.250	No. 60	126.37	14	18	82
0.180	No. 80	240.62	27	45	55
0.150	No. 100	97.66	11	56	44
0.075	No. 200	261.85	30	86	14
Fondo		121.00	14	100	0.0
		875.72	100		

Curva granulométrica



E. Anexo E: Absorción en unidades cerámicas

Absorción en unidades rosadas

Muestra	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Absorción (%)
URS1	4 216	4 938	17.1
URS2	3 926	4 452	13.4
URS3	4 214	4 810	14.1
URS4	2 876	3 368	17.1
URS5	3 516	4 042	15.0

Promedio	15.3
Desviación	1.7
Dispersión (%)	11.1

Absorción en unidades recocidas

Muestra	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Absorción (%)
URC1	3 502	3 896	11.3
URC2	3 972	4 300	8.3
URC3	3 666	3 914	6.8
URC4	3 896	4 212	8.1
URC5	4 020	4 190	4.2

Promedio	7.7
Desviación	2.5
Dispersión (%)	33.0

**F. Anexo F: Resistencia a
compresión en unidades cerámicas**

Resistencia a compresión en unidades rosadas

Muestra	Dimensiones (cm)			Area (cm ²)	Carga (N)	Resistencia (MPa)
	Alto	Largo	Ancho			
URS1	7.0	12.4	12.3	152.5	262 908	17.2
URS2	6.8	12.5	12.3	153.8	237 402	15.4
URS3	7.3	12.4	11.9	147.6	191 295	13.0
URS4	7.4	12.4	12.5	155.0	169 713	10.9
URS5	7.9	12.6	12.7	160.0	235 440	14.7

Promedio	14.3
Desviación	2.4
Dispersión (%)	16.9

Resistencia a compresión en unidades recocidas

Muestra	Dimensiones (cm)			Area (cm ²)	Carga (N)	Resistencia (MPa)
	Alto	Largo	Ancho			
URC1	7.6	12.5	11.9	148.8	378 666	25.5
URC2	6.9	13.0	12.8	166.4	573 885	34.5
URC3	7.4	13.0	12.2	158.6	588 600	37.1
URC4	7.2	12.4	12.2	151.3	490 500	32.4
URC5	7.6	12.5	12.4	155.0	510 120	32.9

Promedio	32.5
Desviación	4.3
Dispersión (%)	13.3

G. Anexo G: Módulo de rotura en unidades cerámicas

Módulo de rotura en unidades rosadas

Muestra	h_f (cm)	b_f (cm)	Luz (cm)	Carga (N)	x^* (mm)	MR (MPa)
URS1	7.9	13.4	22.5	5 817	1.6	2.0
URS2	8.0	11.8	22.1	1 913	6.0	0.4
URS3	7.4	12.9	21.9	3 522	3.8	1.1
URS4	5.9	11.7	20.0	2 923	1.5	1.8
URS5	6.5	11.4	21.8	2 364	0.5	1.5

Promedio 1.4

Desviación 0.6

* x : Distancia desde el plano de falla al centro de la unidad

Dispersión (%) 46.7

Módulo de rotura en unidades recocidas

Muestra	h_f (cm)	b_f (cm)	Luz (cm)	Carga (N)	x^* (mm)	MR (MPa)
URC1	6.1	12.5	21.9	5 454	1.9	3.2
URC2	6.9	12.6	22.5	6 514	0.0	3.7
URC3	6.3	11.8	21.9	12 567	1.5	7.6
URC4	6.8	12.0	21.8	7 426	2.9	3.2
URC5	7.1	12.0	21.5	12 939	1.1	6.2

Promedio 4.8

Desviación 2.0

* x : Distancia desde el plano de falla al centro de la unidad

Dispersión (%) 42.0

**H. Anexo H: Resistencia a
compresión de morteros**

Resistencia a compresión en mortero de cal y arena no carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f _{cp} (MPa)	f _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MCA 1	7	NA	24.5	2 129	0.9	1.0	0.1	6.0
MCA 2	7	NA	24.0	2 467	1.0			
MCA 3	7	NA	24.5	2 433	1.0			
MCA 4	28	NA	24.0	3 743	1.6	1.6	0.2	9.8
MCA 5	28	NA	24.5	3 375	1.4			
MCA 6	28	NA	24.5	4 155	1.7			
MCA 7	60	NA	24.5	4 488	1.8	2.1	0.3	14.8
MCA 8	60	NA	24.0	4 768	2.0			
MCA 9	60	NA	24.0	5 842	2.4			
MCA 10	90	NA	24.5	4 233	1.7	1.7	0.2	11.8
MCA 11	90	NA	24.5	3 777	1.5			
MCA 12	90	NA	24.5	4 704	1.9			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión en mortero de cal y arena carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f _{cp} (MPa)	f _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MCA 1C	7	4	24.5	16 829	6.9	7.1	0.3	4.1
MCA 2C	7	4	24.5	16 819	6.9			
MCA 3C	7	4	24.5	18 021	7.4			
MCA 4C	28	25	24.5	15 750	6.4	7.2	0.9	11.8
MCA 5C	28	25	24.5	19 851	8.1			
MCA 6C	28	25	24.0	17 275	7.2			
MCA 7C	60	57	24.0	18 958	7.9	7.5	0.4	4.8
MCA 8C	60	57	24.0	17 334	7.2			
MCA 9C	60	57	24.0	17 820	7.4			
MCA 10C	90	87	24.0	16 054	6.7	5.8	0.9	15.5
MCA 11C	90	87	25.0	14 676	5.9			
MCA 12C	90	87	24.5	12 061	4.9			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión mortero adicionado con metacaolín no carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK 1	7	NA	24.5	8 427	3.4	3.8	0.5	12.1
MMK 2	7	NA	24.5	10 551	4.3			
MMK 3	7	NA	24.0	8 780	3.7			
MMK 4	28	NA	24.0	10 860	4.5	4.7	0.4	9.3
MMK 5	28	NA	24.5	12 802	5.2			
MMK 6	28	NA	25.0	10 992	4.4			
MMK 7	60	NA	25.0	12 964	5.2	5.5	0.4	7.5
MMK 8	60	NA	24.0	14 337	6.0			
MMK 9	60	NA	24.0	12 885	5.4			
MMK 10	90	NA	24.5	15 358	6.3	6.1	0.2	3.4
MMK 11	90	NA	24.5	14 553	5.9			
MMK 12	90	NA	24.0	14 970	6.2			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión mortero adicionado con metacaolín carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK 1C	7	4	24.5	15 809	6.5	6.4	0.3	5.0
MMK 2C	7	4	24.0	15 794	6.6			
MMK 3C	7	4	24.5	14 715	6.0			
MMK 4C	28	25	24.5	15 367	6.3	6.9	0.5	7.2
MMK 5C	28	25	24.5	17 633	7.2			
MMK 6C	28	25	24.0	17 040	7.1			
MMK 7C	60	57	24.0	15 907	6.6	6.3	0.7	11.6
MMK 8C	60	57	24.0	16 520	6.9			
MMK 9C	60	57	24.0	13 273	5.5			
MMK 10C	90	87	24.5	15 603	6.4	6.0	0.3	5.8
MMK 11C	90	87	24.0	13 935	5.8			
MMK 12C	90	87	24.0	13 886	5.8			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión mortero adicionado con polvo de ladrillo no carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MPL 1	7	NA	24.5	1 967	0.8	1.1	0.3	24.1
MPL 2	7	NA	24.0	2 781	1.2			
MPL 3	7	NA	24.5	3 090	1.3			
MPL 4	28	NA	24.0	4 763	2.0	1.8	0.3	19.2
MPL 5	28	NA	24.5	3 409	1.4			
MPL 6	28	NA	24.0	4 699	2.0			
MPL 7	60	NA	24.0	5 459	2.3	2.3	0.1	2.5
MPL 8	60	NA	24.0	5 425	2.3			
MPL 9	60	NA	24.5	5 969	2.4			
MPL 10	90	NA	24.5	5 940	2.4	2.5	0.1	4.0
MPL 11	90	NA	24.0	5 911	2.5			
MPL 12	90	NA	24.0	6 215	2.6			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión mortero adicionado con polvo de ladrillo carbonatado

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK 1C	7	4	24.5	15 809	6.5	6.4	0.3	5.0
MMK 2C	7	4	24.0	15 794	6.6			
MMK 3C	7	4	24.5	14 715	6.0			
MMK 4C	28	25	24.5	15 367	6.3	6.9	0.5	7.2
MMK 5C	28	25	24.5	17 633	7.2			
MMK 6C	28	25	24.0	17 040	7.1			
MMK 7C	60	57	24.0	15 907	6.6	6.3	0.7	11.6
MMK 8C	60	57	24.0	16 520	6.9			
MMK 9C	60	57	24.0	13 273	5.5			
MMK 10C	90	87	24.5	15 603	6.4	6.0	0.3	5.8
MMK 11C	90	87	24.0	13 935	5.8			
MMK 12C	90	87	24.0	13 886	5.8			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia a compresión mortero cal y arena, utilizado en juntas de muretes de unidad y media, curados en condiciones ambientales

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MCA-1.5U-1	7	NA	24.0	1 334	0.6	0.5	0.1	20.0
MCA-1.5U-2	7	NA	24.0	986	0.4			
MCA-1.5U-3	7	NA	24.0	1 212	0.5			
MCA-1.5U-4	28	NA	24.0	1 805	0.8	0.9	0.1	11.1
MCA-1.5U-5	28	NA	24.0	2 335	1.0			
MCA-1.5U-6	28	NA	24.0	2 207	0.9			
MCA-1.5U-7	60	NA	24.0	2 605	1.1	1.2	0.1	9.4
MCA-1.5U-8	60	NA	24.0	3 012	1.3			
MCA-1.5U-9	60	NA	24.5	3 267	1.3			
MCA-1.5U-10	174	NA	24.5	3 487	1.4	1.2	0.2	12.4
MCA-1.5U-11	174	NA	24.5	2 717	1.1			
MCA-1.5U-12	174	NA	24.5	2 904	1.2			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia compresión mortero adicionado con metacaolín, utilizado en juntas de muretes de unidad y media, curados en condiciones ambientales

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK-1.5U-1	7	NA	24.5	4 361	1.8	1.7	0.2	9.2
MMK-1.5U-2	7	NA	24.0	4 061	1.7			
MMK-1.5U-3	7	NA	24.0	3 654	1.5			
MMK-1.5U-4	28	NA	24.5	4 473	1.8	2.0	0.3	15.8
MMK-1.5U-5	28	NA	24.5	5 817	2.4			
MMK-1.5U-6	28	NA	24.5	4 743	1.9			
MMK-1.5U-7	60	NA	23.5	6 739	2.9	2.9	0.2	5.3
MMK-1.5U-8	60	NA	24.0	7 191	3.0			
MMK-1.5U-9	60	NA	24.0	6 367	2.7			
MMK-1.5U-10	174	NA	23.5	5 489	2.3	2.3	0.1	4.3
MMK-1.5U-11	174	NA	24.5	5 499	2.2			
MMK-1.5U-12	174	NA	24.0	5 847	2.4			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia compresión mortero adicionado con metacaolín, utilizado en juntas de muretes medianos, curados en condiciones ambientales

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK-MD-1	7	NA	25.0	3 659	1.5	1.6	0.1	7.4
MMK-MD-2	7	NA	24.0	3 546	1.5			
MMK-MD-3	7	NA	24.0	4 032	1.7			
MMK-MD-4	28	NA	24.0	4 876	2.0	2.1	0.1	2.8
MMK-MD-5	28	NA	24.0	5 052	2.1			
MMK-MD-6	28	NA	23.5	4 998	2.1			
MMK-MD-7	60	NA	23.0	5 131	2.2	2.3	0.1	4.3
MMK-MD-8	60	NA	24.0	5 876	2.4			
MMK-MD-9	60	NA	24.5	5 602	2.3			
MMK-MD-10	169	NA	24.5	5 180	2.1	2.2	0.1	4.5
MMK-MD-11	169	NA	24.5	5 749	2.3			
MMK-MD-12	169	NA	24.5	5 391	2.2			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

Resistencia compresión mortero adicionado con metacaolín, utilizado en juntas de muretes grandes, curados en condiciones ambientales

Muestra	Edad (días)	ECC* (días)	A (cm ²)	Carga (N)	f' _{cp} (MPa)	f' _{cp prom} (MPa)	σ (MPa)	C.V.** (%)
MMK-GD-1	7	NA	2401	4 635	1.9	1.9	0.1	3.0
MMK-GD-2	7	NA	2401	4 895	2.0			
MMK-GD-3	7	NA	2401	4 493	1.9			
MMK-GD-4	28	NA	2401	6 053	2.5	2.5	0.2	6.2
MMK-GD-5	28	NA	2401	6 313	2.6			
MMK-GD-6	28	NA	2401	5 410	2.3			
MMK-GD-7	60	NA	2401	6 842	2.8	2.7	0.2	5.7
MMK-GD-8	60	NA	2401	5 886	2.5			
MMK-GD-9	60	NA	2401	6 421	2.7			
MMK-GD-10	173	NA	2401	7 613	3.2	3.1	0.3	10.5
MMK-GD-11	173	NA	2303	6 229	2.7			
MMK-GD-12	173	NA	2401	7 887	3.3			

*ECC: Edad en cámara de carbonatación

**C.V.: Coeficiente de variación

I. Anexo I: Profundidad de carbonatación en morteros

Carbonatación en mortero de cal y arena

Profundidad (cm)	5 días			7 días		
	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
1	2.07	2.27	1.99	3.76	3.97	3.67
2	2.18	2.16	2.17	3.81	3.99	3.52
3	2.18	2.22	2.00	3.70	3.80	3.45
4	2.43	2.37	1.98	3.52	3.69	3.45
5	2.13	2.10	1.83	3.53	3.70	3.33
6	1.94	2.42	1.97	3.61	3.59	3.36
7	2.03	2.76	2.00	3.68	3.60	3.39
8	1.91	2.36	1.94	3.69	3.74	3.43
Promedio (cm)	2.11	2.33	1.99	3.66	3.76	3.45

	Profundidad (mm)	
	Promedio	Desviación
5 días	2.14	0.175
7 días	3.62	0.159

$$K_c = \frac{(X_2^2 - X_1^2)^{1/2}}{(t_2 - t_1)^{1/2}}$$

$$K_c = 2.07 \text{ cm/día}^{0.5}$$

Carbonatación en mortero adicionado con metacaolín

Profundidad (cm)	5 días			6 días		
	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
1	4.42	3.52	3.50	4.40	4.14	4.05
2	4.16	3.74	3.49	4.36	4.04	4.16
3	4.10	3.70	3.54	4.24	3.98	4.01
4	4.10	3.63	3.40	4.30	4.10	3.90
5	3.95	3.63	3.69	4.30	4.17	3.86
6	4.05	3.64	3.58	4.34	4.21	3.82
7	4.12	3.62	3.59	4.46	4.06	3.92
8	4.16	3.60	3.44	4.39	3.99	4.02
Promedio (cm)	4.13	3.64	3.53	4.35	4.09	3.97

	Profundidad (mm)	
	Promedio	Desviación
5 días	3.77	0.322
6 días	4.13	0.195

$$K_c = \frac{(X_2^2 - X_1^2)^{1/2}}{(t_2 - t_1)^{1/2}}$$

$$K_c = 1.71 \text{ cm/día}^{0.5}$$

Carbonatación en mortero adicionado con polvo de ladrillo

Profundidad (cm)	5 días			7 días		
	MCA-1	MCA-2	MCA-3	MCA-1	MCA-2	MCA-3
1	2.76	2.67	2.75	3.71	3.79	3.79
2	2.66	2.84	2.78	3.82	3.92	3.67
3	2.78	2.82	2.63	3.74	3.89	3.72
4	2.75	2.79	2.70	3.66	3.86	3.74
5	2.82	2.74	2.77	3.69	3.83	3.84
6	2.71	2.69	2.69	3.67	3.86	3.75
7	2.68	2.67	2.80	3.82	3.78	3.69
8	2.68	2.59	2.84	3.77	3.82	3.77

Promedio (cm)	2.73	2.72	2.74	3.73	3.84	3.75
---------------	------	------	------	------	------	------

	Profundidad (mm)	
	Promedio	Desviación
5 días	2.73	0.010
7 días	3.77	0.059

$$K_c = \frac{(X_2^2 - X_1^2)^{1/2}}{(t_2 - t_1)^{1/2}}$$

$$K_c = 1.84 \text{ cm/día}^{0.5}$$

J. Anexo J: Caracterización de malla electrosoldada

222 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con muros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas

	L*		T**	
	Valor	CD*** (%)	Valor	CD*** (%)
Espaciamiento nominal entre alambres (mm)	150		150	
Diámetro nominal (mm)	5.0		5.0	
Espaciamiento promedio entre alambres (mm)	140	0.9	142	0.9
Máxima diferencia entre espaciado nominal y medido (mm)	-8.0		-6.4	
Diámetro medido (mm)	4.72	3.8	4.80	2.6
Área medida (mm ²)	17.5	7.7	18.1	5.0
Promedio Resistencia a Tracción (MPa)****	636	4.8	639	1.7
Resistencia a Tracción Grafil No. 1 (MPa)	616		649	
Resistencia a Tracción Grafil No. 2 (MPa)	629		649	
Resistencia a Tracción Grafil No. 3 (MPa)	646		623	
Resistencia a Tracción Grafil No. 4 (MPa)	607		639	
Resistencia a Tracción Grafil No. 5 (MPa)	684		636	
Promedio Resistencia a Fluencia (MPa)****	553	2.2	559	8.8
Resistencia a fluencia Grafil No. 1 (MPa)	538		579	
Resistencia a fluencia Grafil No. 2 (MPa)	561		577	
Resistencia a fluencia Grafil No. 3 (MPa)	568		575	
Resistencia a fluencia Grafil No. 4 (MPa)	545		591	
Resistencia a fluencia Grafil No. 5 (MPa)	554		472	
Promedio Fuerza Cortante en Soldadura (N)	9 049		10 372	
Fuerza Cortante en Soldadura Grafil No. 1 (N)	8 619		10 765	
Fuerza Cortante en Soldadura Grafil No. 2 (N)	7 311		10 192	
Fuerza Cortante en Soldadura Grafil No. 3 (N)	9 491		10 319	
Fuerza Cortante en Soldadura Grafil No. 4 (N)	10 339		10 334	
Fuerza Cortante en Soldadura Grafil No. 5 (N)	9 486		10 251	

*L: Sentido longitudinal

**T: Sentido transversal

***CD: Coeficiente de dispersión

****Valor calculado con base al diámetro nominal

K. Anexo K: Caracterización barras de GFRP

BARRA 1

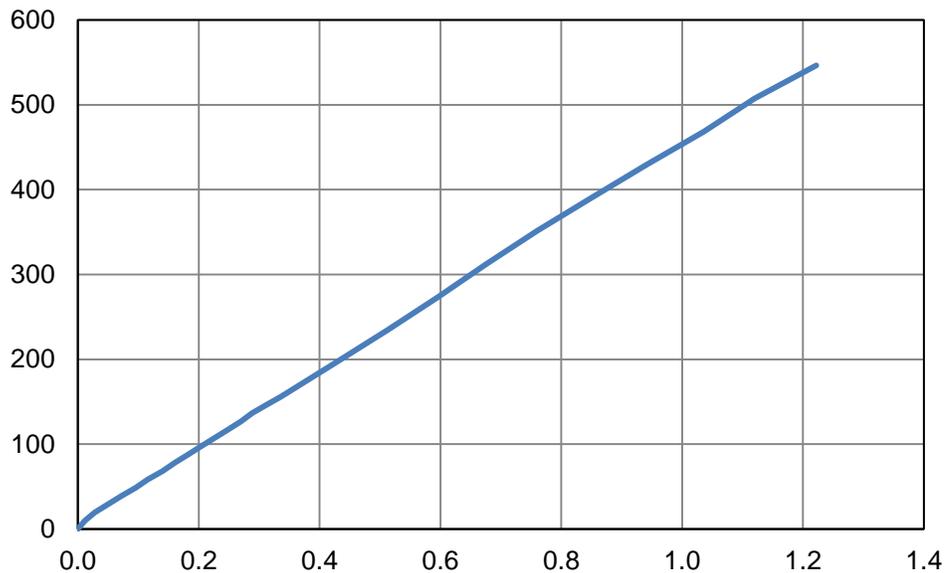
Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
0	0.000000	0.0000	0
491	0.000116	0.0116	10
981	0.000280	0.0280	20
1 472	0.000500	0.0500	29
1 962	0.000720	0.0720	39
2 453	0.000956	0.0956	49
2 943	0.001160	0.1160	59
3 434	0.001400	0.1400	68
3 924	0.001600	0.1600	78
4 415	0.001820	0.1820	88
4 905	0.002040	0.2040	98
5 396	0.002260	0.2260	107
5 886	0.002480	0.2480	117
6 377	0.002700	0.2700	127

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
6 867	0.002880	0.2880	137
7 358	0.003120	0.3120	146
7 848	0.003360	0.3360	156
9 810	0.004240	0.4240	195
11 772	0.005120	0.5120	234
13 734	0.005960	0.5960	273
15 696	0.006760	0.6760	312
17 658	0.007600	0.7600	351
19 620	0.008500	0.8500	390
21 582	0.009412	0.9412	429
23 544	0.010360	1.0360	468
25 506	0.011200	1.1200	507
27 468	0.012220	1.2220	546

$\sigma_{0.001} = 51$ MPa

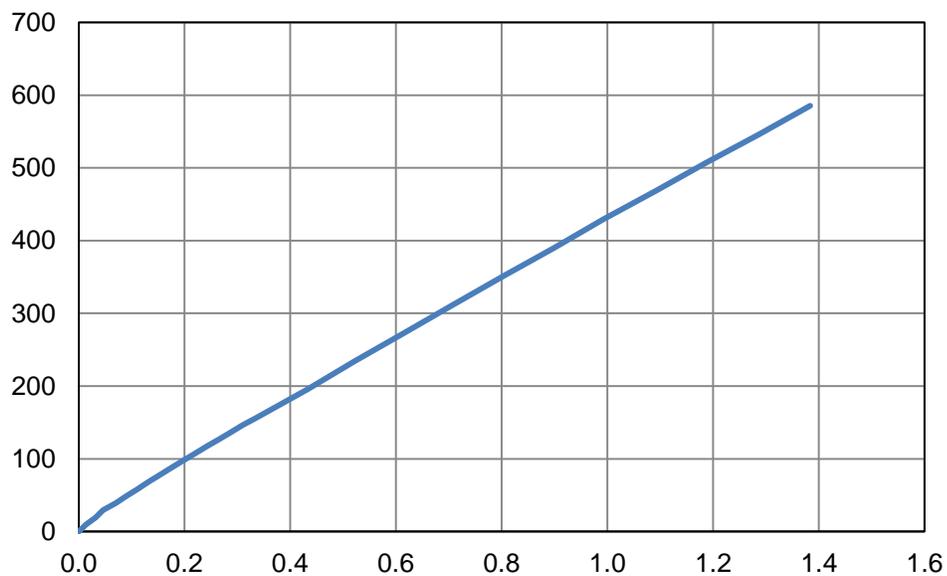
$E = 45\,299$ MPa

$\sigma_{0.003} = 141$ MPa



BARRA 2

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
0	0.000000	0.0000	0	6 867	0.002880	0.2880	137
491	0.000140	0.0140	10	7 358	0.003100	0.3100	146
981	0.000320	0.0320	20	7 848	0.003360	0.3360	156
1 472	0.000460	0.0460	29	9 810	0.004320	0.4320	195
1 962	0.000700	0.0700	39	11 772	0.005220	0.5220	234
2 453	0.000900	0.0900	49	13 734	0.006160	0.6160	273
2 943	0.001120	0.1120	59	15 696	0.007100	0.7100	312
3 434	0.001320	0.1320	68	17 658	0.008040	0.8040	351
3 924	0.001540	0.1540	78	19 620	0.009000	0.9000	390
4 415	0.001760	0.1760	88	21 582	0.009920	0.9920	429
4 905	0.001980	0.1980	98	23 544	0.010920	1.0920	468
5 396	0.002200	0.2200	107	25 506	0.011880	1.1880	507
5 886	0.002420	0.2420	117	27 468	0.012880	1.2880	546
6 377	0.002660	0.2660	127	29 430	0.013840	1.3840	585

 $\sigma_{0.001} = 53 \text{ MPa}$ $E = 44\,355 \text{ MPa}$ $\sigma_{0.003} = 142 \text{ MPa}$ 

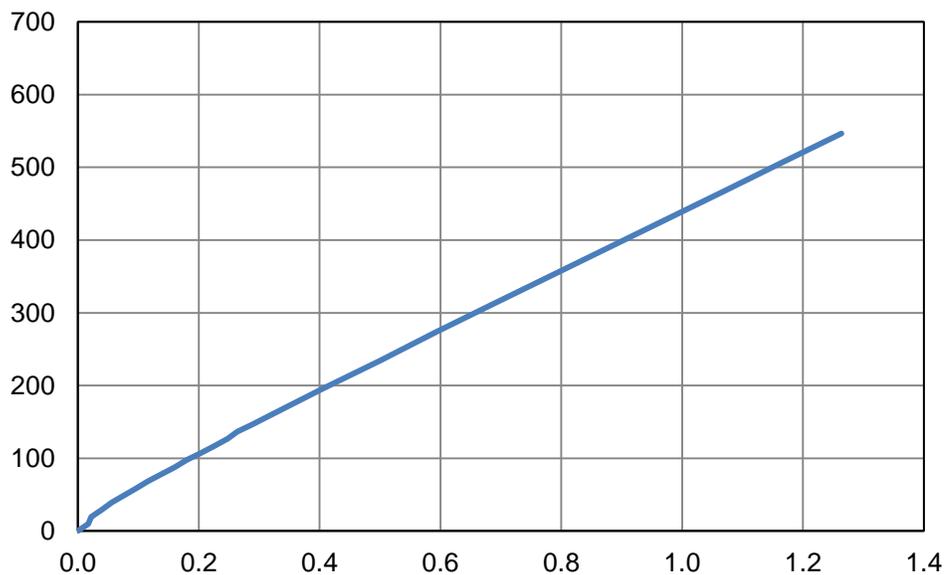
BARRA 3

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
0	0.000000	0.0000	0	6 867	0.002640	0.2640	137
491	0.000172	0.0172	10	7 358	0.002880	0.2880	146
981	0.000220	0.0220	20	7 848	0.003120	0.3120	156
1 472	0.000400	0.0400	29	9 810	0.004040	0.4040	195
1 962	0.000560	0.0560	39	11 772	0.005000	0.5000	234
2 453	0.000760	0.0760	49	13 734	0.005920	0.5920	273
2 943	0.000960	0.0960	59	15 696	0.006880	0.6880	312
3 434	0.001160	0.1160	68	17 658	0.007840	0.7840	351
3 924	0.001380	0.1380	78	19 620	0.008800	0.8800	390
4 415	0.001600	0.1600	88	21 582	0.009760	0.9760	429
4 905	0.001800	0.1800	98	23 544	0.010720	1.0720	468
5 396	0.002040	0.2040	107	25 506	0.011680	1.1680	507
5 886	0.002260	0.2260	117	27 468	0.012640	1.2640	546
6 377	0.002480	0.2480	127	29 430	0.013600	1.3600	585

$\sigma_{0.001} = 61 \text{ MPa}$

$E = 51\,287 \text{ MPa}$

$\sigma_{0.003} = 151 \text{ MPa}$



**L. Anexo L: Resistencia a
compresión en muretes de unidad y
media**

Resistencia a compresión en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal y arena, curados en cámara de carbonatación

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
MCA1-1.5-C	34.1	38.0	12.0	456	1.06	130 100	3.0
MCA2-1.5-C	34.4	37.7	12.6	475	1.05	215 035	4.8
MCA3-1.5-C	33.3	37.7	12.3	464	1.05	206 402	4.7
MCA4-1.5-C	34.9	37.9	12.2	462	1.06	193 649	4.4

Promedio 4.2
Desviación 0.8
Dispersión (%) 19.7

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal y arena, curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
MCA1-1.5-NC	33.0	38.0	12.6	479	1.05	159 000	3.5
MCA2-1.5-NC	33.4	36.9	12.2	450	1.05	109 460	2.6
MCA3-1.5-NC	32.5	37.5	12.2	458	1.05	132 180	3.0
MCA4-1.5-NC	35.8	37.5	12.5	469	1.06	99 905	2.3

Promedio 2.9
Desviación 0.5
Dispersión (%) 18.2

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-1.5U-NR	35.2	37.1	12.0	445	1.06	196 985	4.7
M2-1.5U-NR	34.5	37.6	12.4	466	1.06	162 081	3.7
M3-1.5U-NR	33.5	37.9	12.4	470	1.05	125 548	2.8
M4-1.5U-NR	32.9	37.9	11.9	451	1.06	136 418	3.2
M5-1.5U-NR	33.4	38.0	11.8	448	1.06	122 174	2.9
M6-1.5U-NR	31.8	38.2	12.4	474	1.05	92 057	2.0

Promedio 3.2

Desviación 0.9

Dispersión (%) 28.5

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-1.5U-ME	33.2	38.0	16.0	608	1.01	273 209	4.5
M2-1.5U-ME	33.9	38.6	16.8	648	1.00	264 576	4.1
M3-1.5U-ME	33.1	38.5	15.9	612	1.01	315 882	5.2

Promedio 4.6

Desviación 0.6

Dispersión (%) 12.1

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes de unidad y media, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con

metacaolín, reforzados con barra de GFRP y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-1.5U-BFRP	33.1	37.6	11.8	444	1.06	344 920	8.2
M2-1.5U-BFRP	34.0	38.0	12.0	456	1.06	322 749	7.5
M3-1.5U-BFRP	34.4	38.1	12.0	457	1.06	190 706	4.4

Promedio 6.7
Desviación 2.0
Dispersión (%) 30.2

f_e: Factor de corrección por esbeltez

M. Anexo M: Módulo elástico en muretes de unidad y media

Módulo elástico en muretes de unidad y media, construidos con mortero de cal y arena, carbonatados

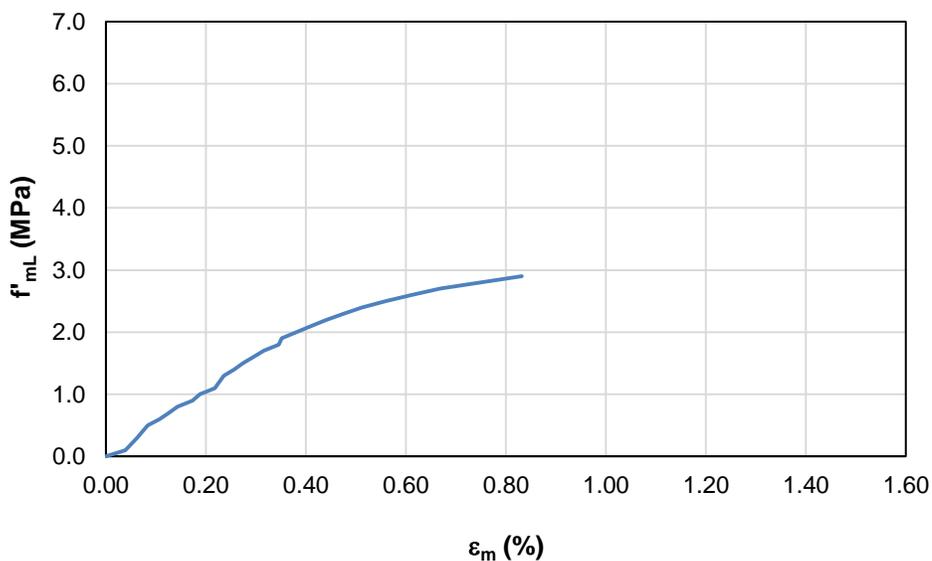
MCA1-1.5U-C

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
167	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000388	0.0388	0.1
9 810	0.000507	0.0507	0.2
14 715	0.000626	0.0626	0.3
19 620	0.000835	0.0835	0.5
24 525	0.001073	0.1073	0.6
29 430	0.001252	0.1252	0.7
34 335	0.001431	0.1431	0.8
39 240	0.001729	0.1729	0.9
44 145	0.001878	0.1878	1.0
49 050	0.002176	0.2176	1.1
53 955	0.002355	0.2355	1.3
58 860	0.002564	0.2564	1.4

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
63 765	0.002743	0.2743	1.5
68 670	0.002951	0.2951	1.6
73 575	0.003160	0.3160	1.7
78 480	0.003458	0.3458	1.8
83 385	0.003518	0.3518	1.9
88 290	0.004114	0.4114	2.1
93 195	0.004412	0.4412	2.2
98 100	0.004770	0.4770	2.3
103 005	0.005128	0.5128	2.4
107 910	0.005605	0.5605	2.5
112 815	0.006112	0.6112	2.6
117 720	0.006678	0.6678	2.7
122 625	0.008318	0.8318	2.9

0.05 f'_{mL} = 0.2 MPa $\epsilon_{0.05}$ = 0.000507
 0.33 f'_{mL} = 1.0 MPa $\epsilon_{0.33}$ = 0.001878

E_m = 583 MPa



MCA2-1.5U-C

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
294	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000060	0.0060	0.1
9 810	0.000091	0.0091	0.2
14 715	0.000121	0.0121	0.3
19 620	0.000181	0.0181	0.4
24 525	0.000242	0.0242	0.5
29 430	0.000333	0.0333	0.7
34 335	0.000423	0.0423	0.8
39 240	0.000544	0.0544	0.9
44 145	0.000695	0.0695	1.0
49 050	0.000847	0.0847	1.1
53 955	0.000968	0.0968	1.2
58 860	0.001149	0.1149	1.3
63 765	0.001391	0.1391	1.4
68 670	0.001512	0.1512	1.5
73 575	0.001724	0.1724	1.6
78 480	0.001935	0.1935	1.7

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
83 385	0.002147	0.2147	1.8
88 290	0.002359	0.2359	2.0
93 195	0.002631	0.2631	2.1
98 100	0.002812	0.2812	2.2
103 005	0.003084	0.3084	2.3
107 910	0.003296	0.3296	2.4
112 815	0.003508	0.3508	2.5
117 720	0.003689	0.3689	2.6
122 625	0.003780	0.3780	2.7
127 530	0.003961	0.3961	2.8
132 435	0.004034	0.4034	2.9
137 340	0.004173	0.4173	3.0
142 245	0.004294	0.4294	3.1
147 150	0.004354	0.4354	3.3
152 055	0.004385	0.4385	3.4
156 960	0.004475	0.4475	3.5

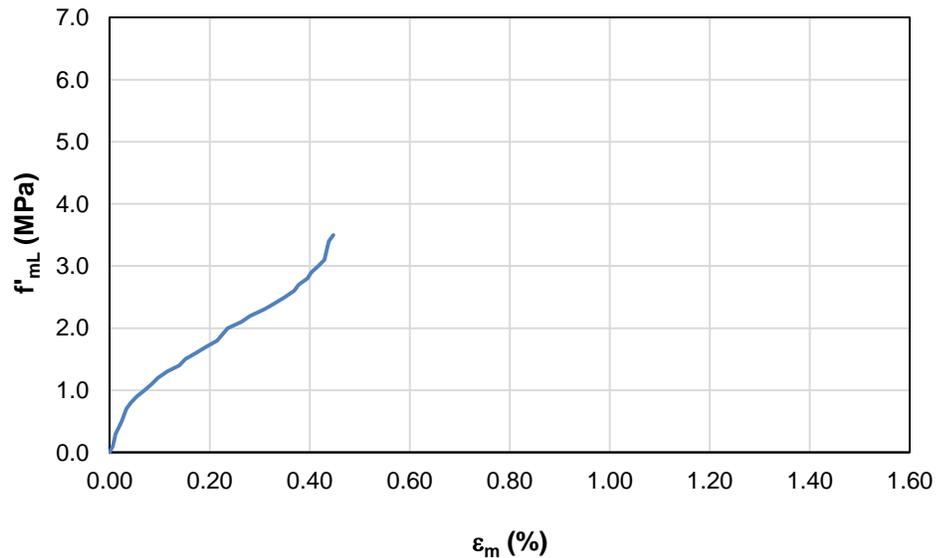
$0.05 f'_{mL} = 0.2$

$\epsilon_{0.05} = 0.000091$

$0.33 f'_{mL} = 1.6$

$\epsilon_{0.33} = 0.001724$

E_m (MPa) = 857



MCA3-1.5U-C

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
294	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000121	0.0121	0.1
12 753	0.000181	0.0181	0.3
14 715	0.000242	0.0242	0.3
19 620	0.000423	0.0423	0.4
24 525	0.000544	0.0544	0.6
29 430	0.000847	0.0847	0.7
34 335	0.001210	0.1210	0.8
39 240	0.001633	0.1633	0.9
44 145	0.001935	0.1935	1.0
49 050	0.002268	0.2268	1.1
53 955	0.002480	0.2480	1.2
58 860	0.002661	0.2661	1.3
63 765	0.002812	0.2812	1.4
68 670	0.003084	0.3084	1.6
73 575	0.003205	0.3205	1.7
78 480	0.003387	0.3387	1.8
83 385	0.003659	0.3659	1.9

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
88 290	0.003901	0.3901	2.0
93 195	0.004173	0.4173	2.1
98 100	0.004354	0.4354	2.2
103 005	0.004657	0.4657	2.3
107 910	0.004899	0.4899	2.4
112 815	0.005050	0.5050	2.6
117 720	0.005261	0.5261	2.7
122 625	0.005443	0.5443	2.8
127 530	0.005685	0.5685	2.9
132 435	0.005806	0.5806	3.0
137 340	0.005927	0.5927	3.1
142 245	0.006169	0.6169	3.2
147 150	0.006229	0.6229	3.3
152 055	0.006410	0.6410	3.4
156 960	0.006471	0.6471	3.6
164 808	0.006562	0.6562	3.7
166 770	0.006592	0.6592	3.8

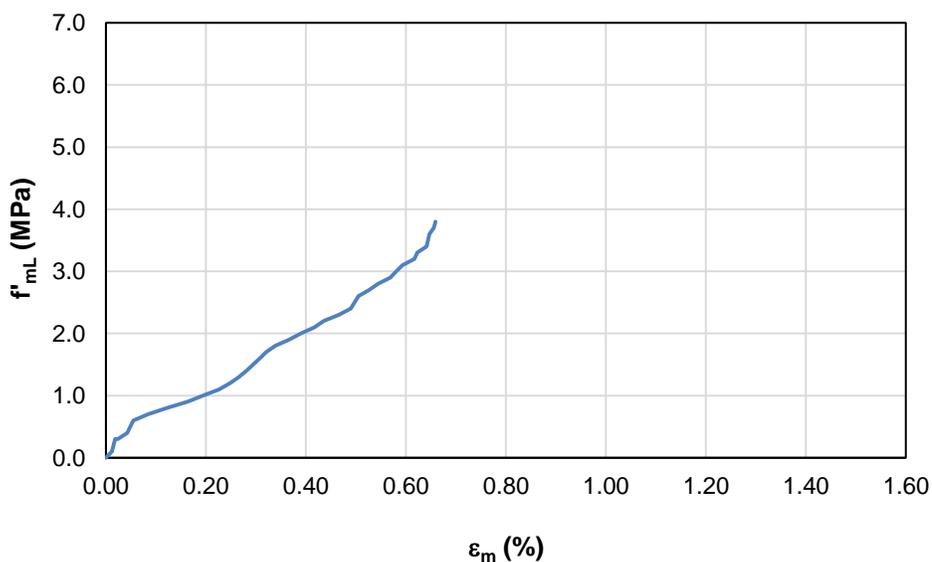
$0.05 f'_{mL} = 0.2$

$\epsilon_{0.05} = 0.000151$

$0.33 f'_{mL} = 1.6$

$\epsilon_{0.33} = 0.003084$

E_m (MPa) = 477



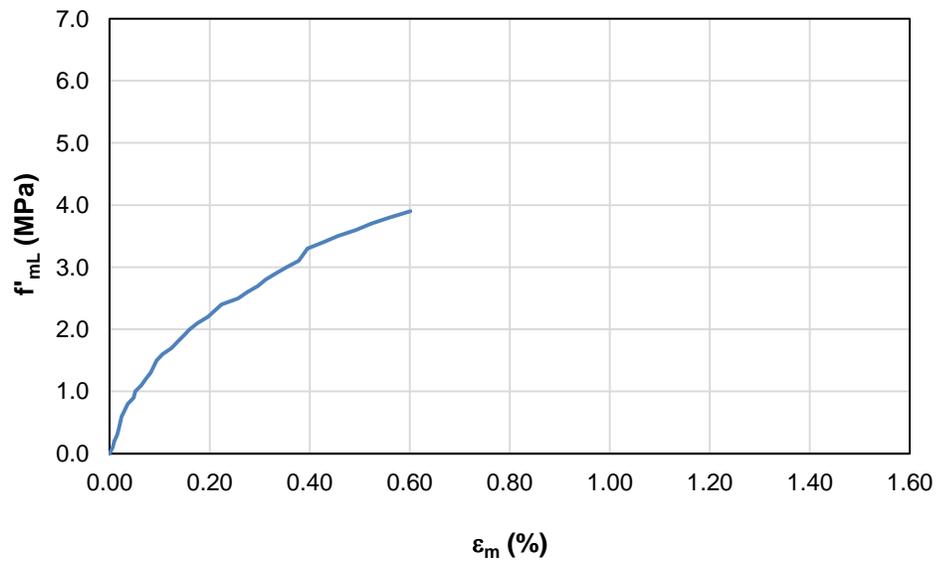
MCA4-1.5U-C

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
275	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000060	0.0060	0.1
9 810	0.000091	0.0091	0.2
14 715	0.000151	0.0151	0.3
19 620	0.000181	0.0181	0.4
24 525	0.000242	0.0242	0.6
29 430	0.000302	0.0302	0.7
34 335	0.000363	0.0363	0.8
39 240	0.000484	0.0484	0.9
44 145	0.000514	0.0514	1.0
49 050	0.000635	0.0635	1.1
53 955	0.000726	0.0726	1.2
58 860	0.000816	0.0816	1.3
63 765	0.000937	0.0937	1.5
68 670	0.001058	0.1058	1.6
73 575	0.001240	0.1240	1.7
78 480	0.001361	0.1361	1.8
83 385	0.001482	0.1482	1.9

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
88 290	0.001603	0.1603	2.0
93 195	0.001754	0.1754	2.1
98 100	0.001965	0.1965	2.2
103 005	0.002238	0.2238	2.4
107 910	0.002570	0.2570	2.5
112 815	0.002752	0.2752	2.6
117 720	0.002963	0.2963	2.7
122 625	0.003115	0.3115	2.8
127 530	0.003326	0.3326	2.9
132 435	0.003538	0.3538	3.0
137 340	0.003780	0.3780	3.1
142 245	0.003961	0.3961	3.3
147 150	0.004264	0.4264	3.4
152 055	0.004566	0.4566	3.5
156 960	0.004929	0.4929	3.6
161 865	0.005231	0.5231	3.7
166 770	0.005594	0.5594	3.8
171 675	0.006017	0.6017	3.9

0.05 f'_{mL} = 0.2 $\epsilon_{0.05}$ = 0.000091
0.33 f'_{mL} = 1.5 $\epsilon_{0.33}$ = 0.000937

E_m (MPa) = 1535



Módulo elástico en muretes de unidad y media, construidos con mortero de cal y arena, no carbonatados

MCA1-1.5U-NC

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
294	0.000000	0.0000	0.0	78 480	0.006108	0.6108	1.7
4 905	0.000030	0.0030	0.1	83 385	0.006410	0.6410	1.8
9 810	0.000121	0.0121	0.2	88 290	0.006894	0.6894	1.9
14 715	0.000242	0.0242	0.3	93 195	0.007318	0.7318	2.0
19 620	0.000544	0.0544	0.4	98 100	0.007499	0.7499	2.2
24 525	0.000937	0.0937	0.5	103 005	0.007862	0.7862	2.3
29 430	0.001391	0.1391	0.6	107 910	0.008285	0.8285	2.4
34 335	0.001845	0.1845	0.8	112 815	0.008709	0.8709	2.5
39 240	0.002298	0.2298	0.9	117 720	0.009192	0.9192	2.6
44 145	0.002752	0.2752	1.0	122 625	0.009737	0.9737	2.7
49 050	0.003266	0.3266	1.1	132 435	0.010765	1.0765	2.9
53 955	0.003750	0.3750	1.2	137 340	0.011490	1.1490	3.0
58 860	0.004294	0.4294	1.3	142 245	0.012035	1.2035	3.1
63 765	0.004808	0.4808	1.4	147 150	0.012579	1.2579	3.2
68 670	0.005231	0.5231	1.5	152 055	0.013305	1.3305	3.3
73 575	0.005745	0.5745	1.6	156 960	0.014091	1.4091	3.4

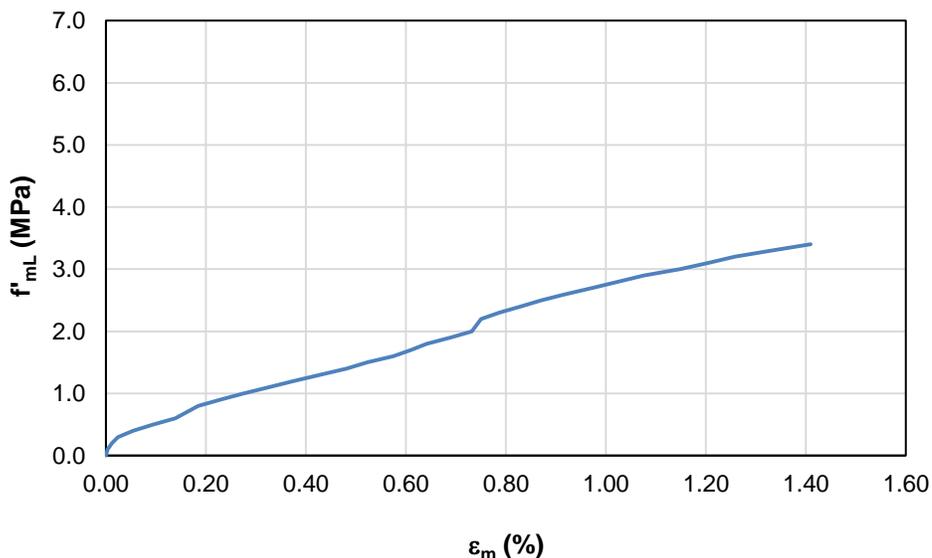
$0.05 f'_{mL} = 0.2$

$\epsilon_{0.05} = 0.000121$

$0.33 f'_{mL} = 1.2$

$\epsilon_{0.33} = 0.003750$

E_m (MPa) = 276



MCA2-1.5U-NC

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
245	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000000	0.0000	0.1
9 810	0.000124	0.0124	0.2
14 715	0.000248	0.0248	0.3
19 620	0.000372	0.0372	0.5
24 525	0.000558	0.0558	0.6
29 430	0.000867	0.0867	0.7
34 335	0.001115	0.1115	0.8
39 240	0.001363	0.1363	0.9
44 145	0.001735	0.1735	1.0
49 050	0.001982	0.1982	1.1
53 955	0.002354	0.2354	1.3

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
58 860	0.002602	0.2602	1.4
63 765	0.002912	0.2912	1.5
68 670	0.003283	0.3283	1.6
73 575	0.003655	0.3655	1.7
78 480	0.004151	0.4151	1.8
83 385	0.004646	0.4646	1.9
88 290	0.005328	0.5328	2.1
93 195	0.006195	0.6195	2.2
98 100	0.007062	0.7062	2.3
103 005	0.008673	0.8673	2.4
107 910	0.009664	0.9664	2.5

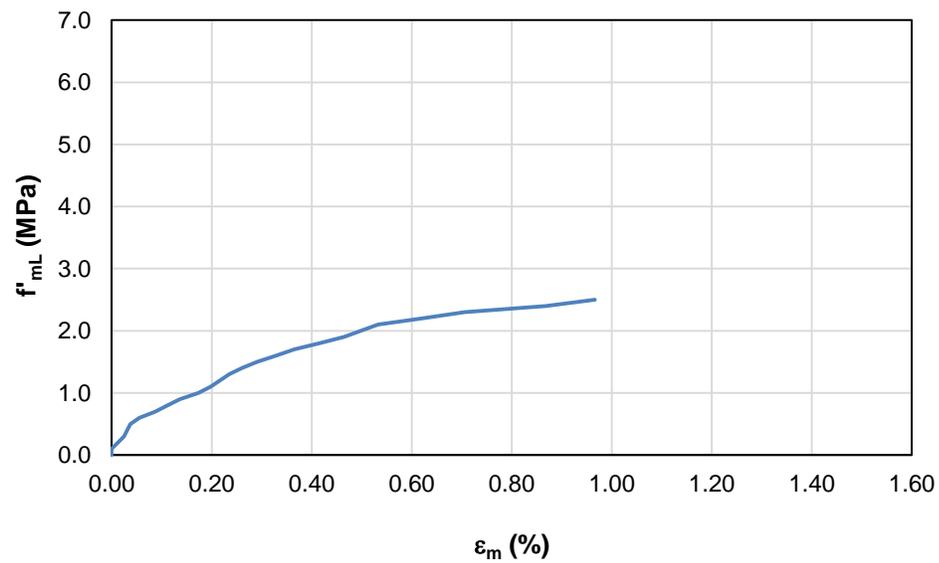
$$0.05 f'_{mL} = 0.1$$

$$\varepsilon_{0.05} = 0.000000$$

$$0.33 f'_{mL} = 0.9$$

$$\varepsilon_{0.33} = 0.001363$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{587}$$



MCA3-1.5U-NC

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0	68 670	0.003266	0.3266	1.6
4 905	0.000605	0.0605	0.1	73 575	0.003689	0.3689	1.7
9 810	0.000605	0.0605	0.2	78 480	0.004112	0.4112	1.8
14 715	0.000665	0.0665	0.3	83 385	0.004596	0.4596	1.9
19 620	0.000847	0.0847	0.5	88 290	0.004959	0.4959	2.0
24 525	0.001028	0.1028	0.6	93 195	0.005443	0.5443	2.1
29 430	0.001270	0.1270	0.7	98 100	0.006169	0.6169	2.3
34 335	0.001572	0.1572	0.8	103 005	0.006713	0.6713	2.4
39 240	0.001814	0.1814	0.9	107 910	0.007378	0.7378	2.5
44 145	0.002056	0.2056	1.0	112 815	0.007922	0.7922	2.6
49 050	0.002419	0.2419	1.1	117 720	0.008588	0.8588	2.7
53 955	0.002480	0.2480	1.2	122 625	0.009434	0.9434	2.8
58 860	0.002721	0.2721	1.4	127 530	0.010160	1.0160	2.9
63 765	0.002903	0.2903	1.5	132 435	0.010644	1.0644	3.0

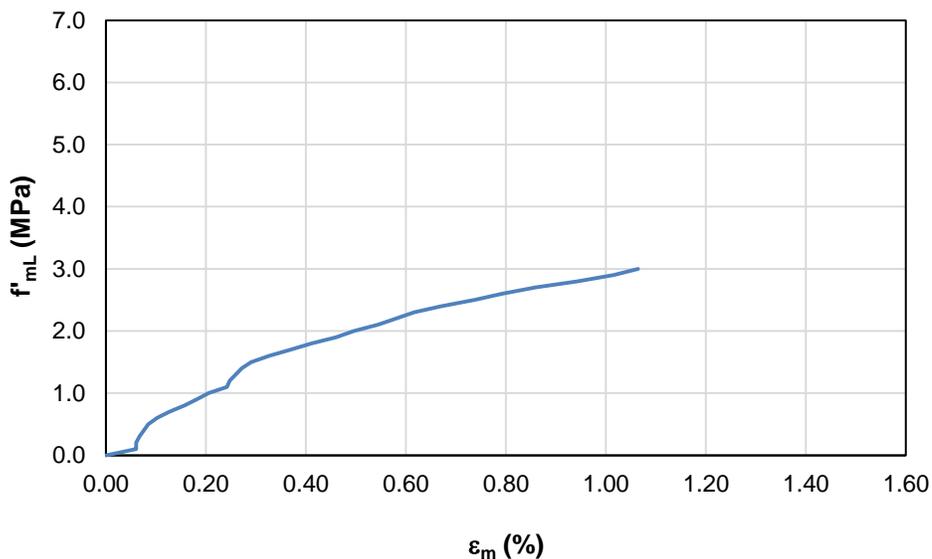
0.05 f'_{mL} = 0.2

$\varepsilon_{0.05}$ = 0.000605

0.33 f'_{mL} = 1

$\varepsilon_{0.33}$ = 0.002056

E_m (MPa) = 551



MCA4-1.5U-NC

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0
4 905	0.000119	0.0119	0.1
9 810	0.000238	0.0238	0.2
14 715	0.000358	0.0358	0.3
19 620	0.000596	0.0596	0.4
24 525	0.000835	0.0835	0.6
29 430	0.001073	0.1073	0.7
34 335	0.001312	0.1312	0.8
39 240	0.001431	0.1431	0.9
44 145	0.001669	0.1669	1.0
49 050	0.001908	0.1908	1.1

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
53 955	0.002087	0.2087	1.2
58 860	0.002266	0.2266	1.3
63 765	0.002504	0.2504	1.4
68 670	0.002743	0.2743	1.6
73 575	0.003100	0.3100	1.0
78 480	0.003458	0.3458	1.8
83 385	0.003935	0.3935	1.9
88 290	0.004412	0.4412	2.0
93 195	0.005008	0.5008	2.1
98 100	0.006082	0.6082	2.2

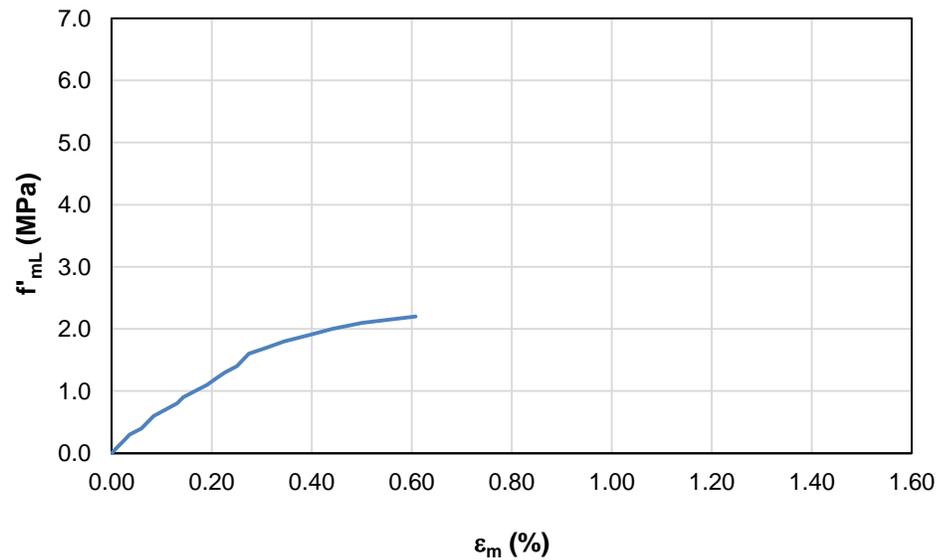
$$0.05 f'_{mL} = 0.1$$

$$\varepsilon_{0.05} = 0.000119$$

$$0.33 f'_{mL} = 0.8$$

$$\varepsilon_{0.33} = 0.001312$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{587}$$



Módulo elástico en muretes de unidad y media, contruidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

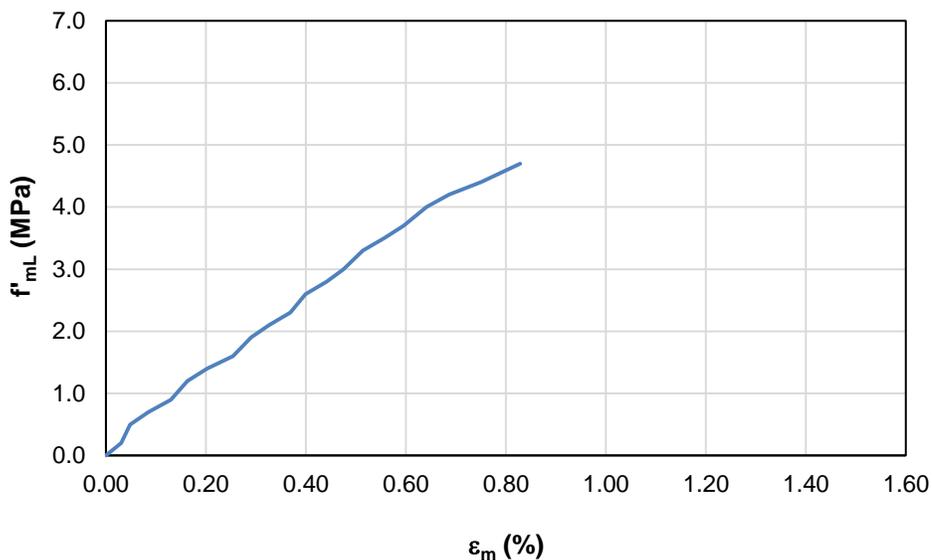
M1-1.5U-NR

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
324	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000302	0.0302	0.2
19 620	0.000484	0.0484	0.5
29 430	0.000847	0.0847	0.7
39 240	0.001300	0.1300	0.9
49 050	0.001633	0.1633	1.2
58 860	0.002026	0.2026	1.4
68 670	0.002540	0.2540	1.6
78 480	0.002903	0.2903	1.9
88 290	0.003266	0.3266	2.1
98 100	0.003689	0.3689	2.3

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
107 910	0.003991	0.3991	2.6
117 720	0.004415	0.4415	2.8
127 530	0.004747	0.4747	3.0
137 340	0.005140	0.5140	3.3
147 150	0.005564	0.5564	3.5
156 960	0.005957	0.5957	3.7
166 770	0.006410	0.6410	4.0
176 580	0.006864	0.6864	4.2
186 390	0.007499	0.7499	4.4
196 200	0.008285	0.8285	4.7

$0.05 f'_{mL} = 0.2$ $\epsilon_{0.05} = 0.000302$
 $0.33 f'_{mL} = 1.6$ $\epsilon_{0.33} = 0.002540$

E_m (MPa) = 626



M2-1.5U-NR

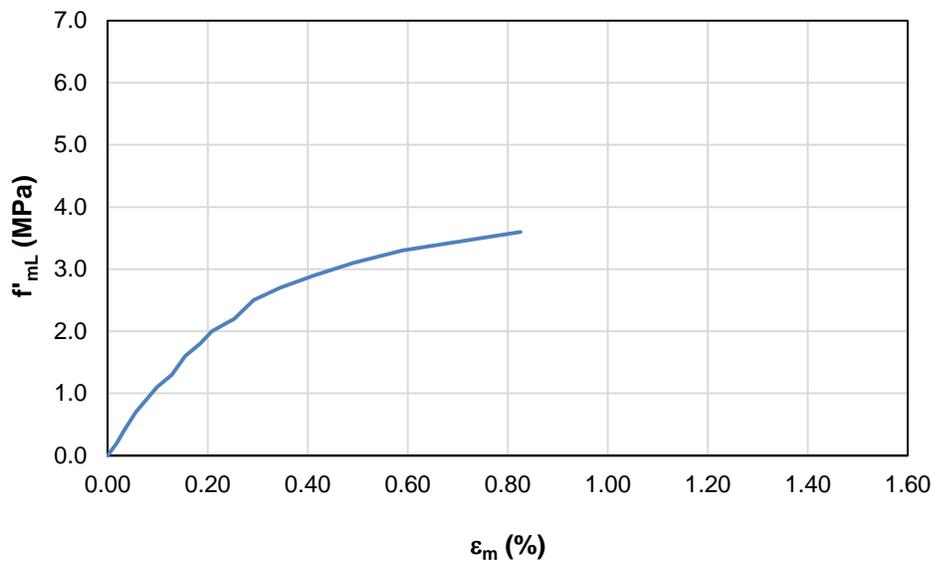
Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
245	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000179	0.0179	0.2
19 620	0.000328	0.0328	0.4
29 430	0.000566	0.0566	0.7
39 240	0.000775	0.0775	0.9
49 050	0.000984	0.0984	1.1
58 860	0.001282	0.1282	1.3
68 670	0.001550	0.1550	1.6
78 480	0.001848	0.1848	1.8

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
88 290	0.002087	0.2087	2.0
98 100	0.002534	0.2534	2.2
107 910	0.002922	0.2922	2.5
117 720	0.003458	0.3458	2.7
127 530	0.004144	0.4144	2.9
137 340	0.004919	0.4919	3.1
147 150	0.005903	0.5903	3.3
156 960	0.008258	0.8258	3.6

$$0.05 f'_{mL} = 0.2 \quad \varepsilon_{0.05} = 0.000179$$

$$0.33 f'_{mL} = 1.2 \quad \varepsilon_{0.33} = 0.001133$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{1048}$$



M3-1.5U-NR

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
324	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000063	0.0063	0.2
19 620	0.000375	0.0375	0.4
29 430	0.000876	0.0876	0.7
39 240	0.001376	0.1376	0.9
49 050	0.001877	0.1877	1.1
58 860	0.002377	0.2377	1.3

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
68 670	0.002878	0.2878	.5
78 480	0.003629	0.3629	1.8
88 290	0.004572	0.4572	2.0
98 100	0.005588	0.5588	2.2
107 910	0.006604	0.6604	2.4
117 720	0.009271	0.9271	2.6

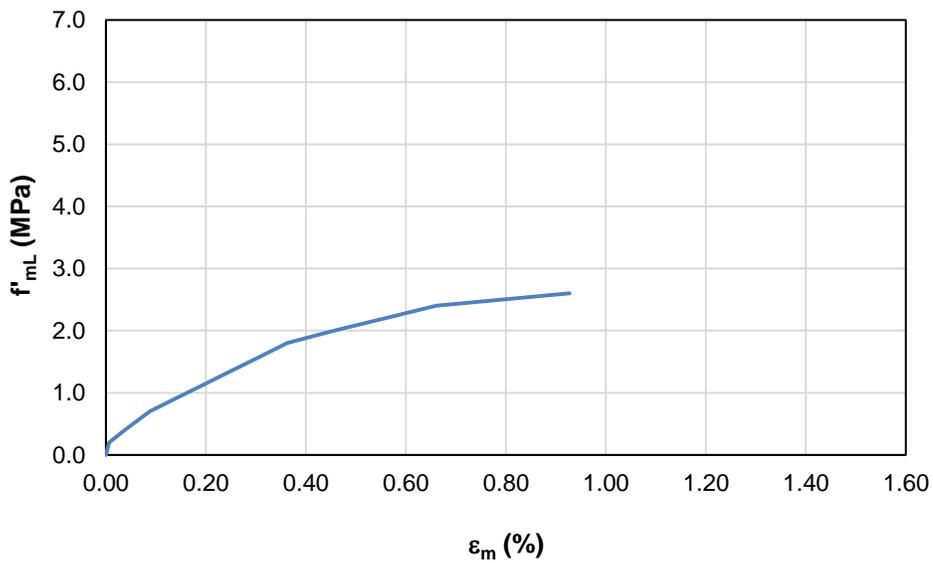
0.05 f'_{mL} = 0.1

$\varepsilon_{0.05}$ = 0.000031

0.33 f'_{mL} = 0.9

$\varepsilon_{0.33}$ = 0.001376

E_m (MPa) = 595



M4-1.5U-NR

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0	68 670	0.002842	0.2842	1.6
9 810	0.000272	0.0272	0.2	78 480	0.003266	0.3266	1.8
19 620	0.000544	0.0544	0.5	88 290	0.003750	0.3750	2.1
29 430	0.000937	0.0937	0.7	98 100	0.004233	0.4233	2.3
39 240	0.001482	0.1482	0.9	107 910	0.004626	0.4626	2.5
49 050	0.002026	0.2026	1.2	117 720	0.004959	0.4959	2.8
58 860	0.002467	0.2467	1.4	127 530	0.005322	0.5322	3.0

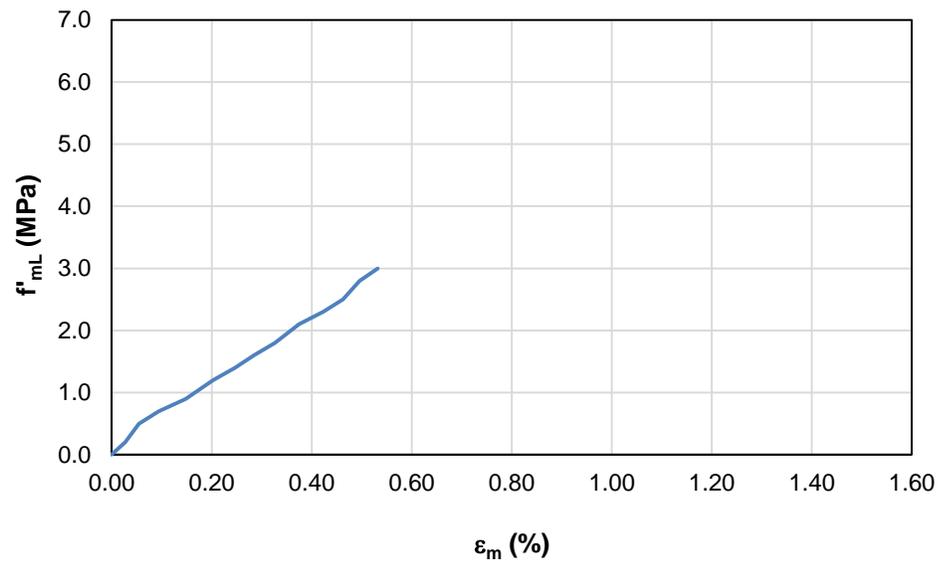
$$0.05 f'_{mL} = 0.2$$

$$\varepsilon_{0.05} = 0.000272$$

$$0.33 f'_{mL} = 1.1$$

$$\varepsilon_{0.33} = 0.001845$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{572}$$



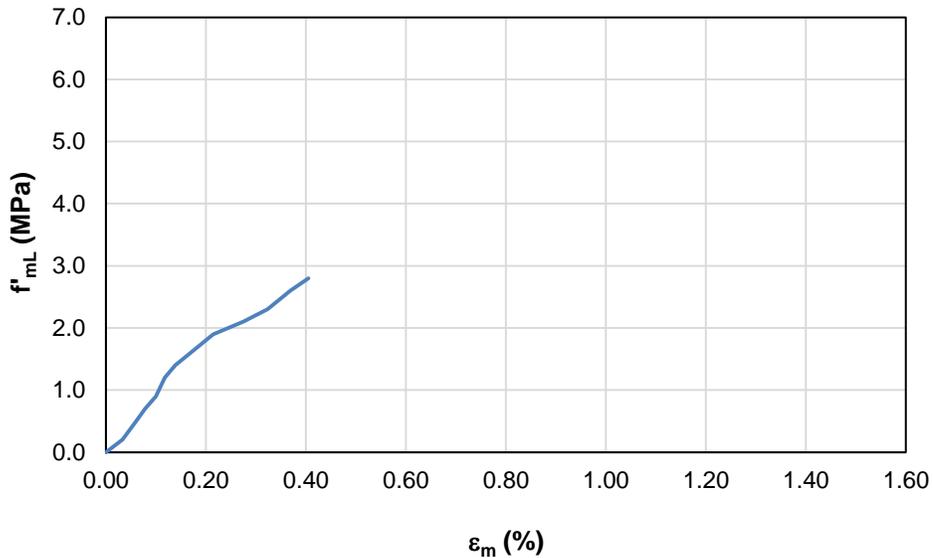
M5-1.5U-NR

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000333	0.0333	0.2
19 620	0.000605	0.0605	0.5
29 430	0.000786	0.0786	0.7
39 240	0.000998	0.0998	0.9
49 050	0.001179	0.1179	1.2
58 860	0.001391	0.1391	1.4

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
68 670	0.001693	0.1693	1.6
78 480	0.002147	0.2147	1.9
88 290	0.002752	0.2752	2.1
98 100	0.003235	0.3235	2.3
107 910	0.003689	0.3689	2.6
117 720	0.004052	0.4052	2.8

$0.05 f'_{mL} = 0.1$ $\varepsilon_{0.05} = 0.000166$
 $0.33 f'_{mL} = 1.0$ $\varepsilon_{0.33} = 0.001058$

E_m (MPa) = 1009



M6-1.5U-NR

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000298	0.0298	0.2
19 620	0.000537	0.0537	0.4
29 430	0.000894	0.0894	0.7
39 240	0.001252	0.1252	0.9

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
49 050	0.002658	0.2658	1.1
58 860	0.003544	0.3544	1.3
68 670	0.004489	0.4489	1.5
78 480	0.004844	0.4844	1.7

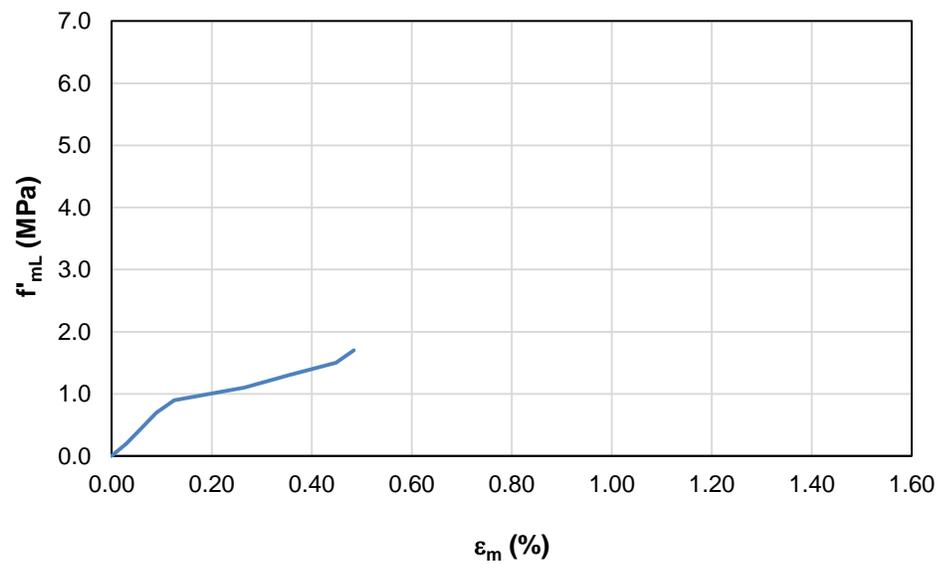
$$0.05 f'_{mL} = 0.1$$

$$\varepsilon_{0.05} = 0.000149$$

$$0.33 f'_{mL} = 0.7$$

$$\varepsilon_{0.33} = 0.000894$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{805}$$



Módulo elástico en muretes de unidad y media, contruidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

M1-1.5U-ME

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
481	0.000000	0.0000	0.0	127 530	0.004475	0.4475	2.1
9 810	0.000060	0.0060	0.2	137 340	0.004899	0.4899	2.3
19 620	0.000151	0.0151	0.3	147 150	0.005352	0.5352	2.4
29 430	0.000423	0.0423	0.5	156 960	0.005987	0.5987	2.6
39 240	0.000877	0.0877	0.7	166 770	0.006562	0.6562	2.8
49 050	0.001270	0.1270	0.8	176 580	0.007197	0.7197	2.9
58 860	0.001663	0.1663	1.0	186 390	0.007771	0.7771	3.1
68 670	0.002026	0.2026	1.1	196 200	0.008013	0.8013	3.3
78 480	0.002449	0.2449	1.3	206 010	0.008285	0.8285	3.4
88 290	0.002873	0.2873	1.5	215 820	0.008890	0.8890	3.6
98 100	0.003266	0.3266	1.6	225 630	0.008981	0.8981	3.7
107 910	0.003659	0.3659	1.8	235 440	0.009706	0.9706	3.9
117 720	0.004052	0.4052	2.0	245 250	0.010493	1.0493	4.1

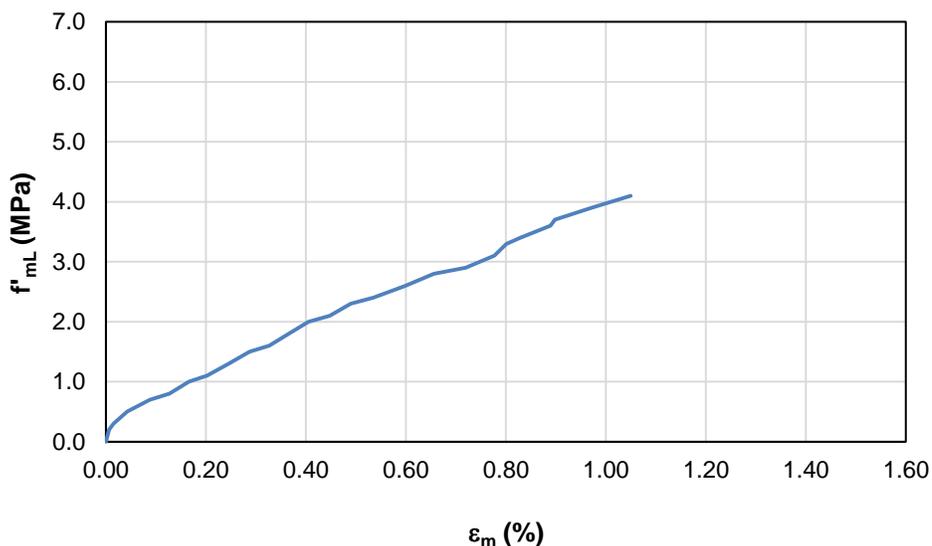
$0.05 f'_{mL} = 0.2$

$\epsilon_{0.05} = 0.000060$

$0.33 f'_{mL} = 1.5$

$\epsilon_{0.33} = 0.002873$

E_m (MPa) = 462

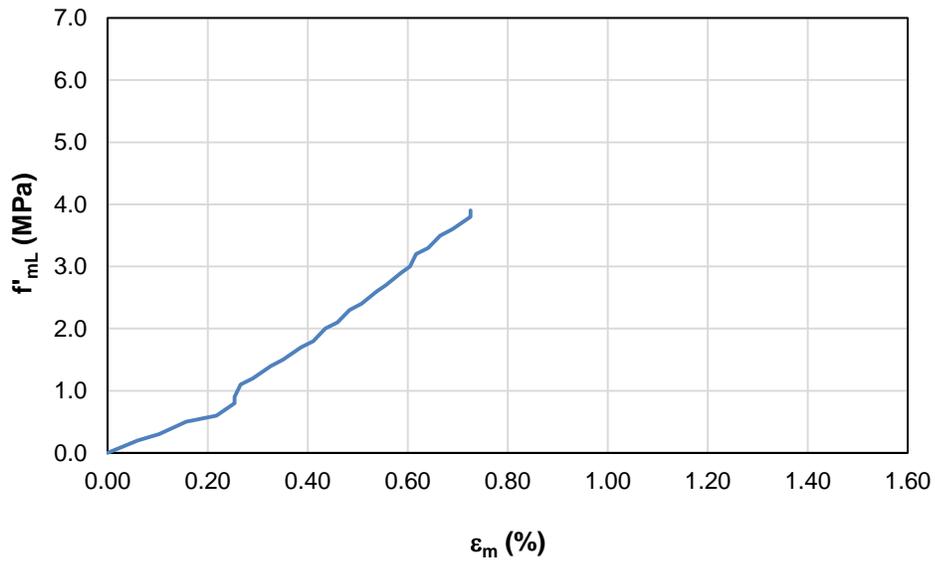


M2-1.5U-ME

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.0	137 340	0.004596	0.4596	2.1
9 810	0.000605	0.0605	0.2	147 150	0.004838	0.4838	2.3
19 620	0.001028	0.1028	0.3	156 960	0.00508	0.5080	2.4
29 430	0.001572	0.1572	0.5	166 770	0.005382	0.5382	2.6
39 240	0.002177	0.2177	0.6	176 580	0.005564	0.5564	2.7
49 050	0.002540	0.2540	0.8	186 390	0.005866	0.5866	2.9
58 860	0.002540	0.2540	0.9	196 200	0.006048	0.6048	3.0
68 670	0.002661	0.2661	1.1	206 010	0.006169	0.6169	3.2
78 480	0.002903	0.2 03	1.2	215 820	0.006410	0.6410	3.3
88 290	0.003266	0.3266	1.4	225 630	0.006652	0.6652	3.5
98 100	0.003508	0.3508	1.5	235 440	0.006894	0.6894	3.6
107 910	0.003870	0.3870	1.7	245 250	0.007257	0.7257	3.8
117 720	0.004112	0.4112	1.8	255 060	0.007257	0.7257	3.9
127 530	0.004354	0.4354	2.0				

0.05 f'_{mL} = 0.2 $\epsilon_{0.05} = 0.000605$
0.33 f'_{mL} = 1.4 $\epsilon_{0.33} = 0.003266$

E_m (MPa) = 451

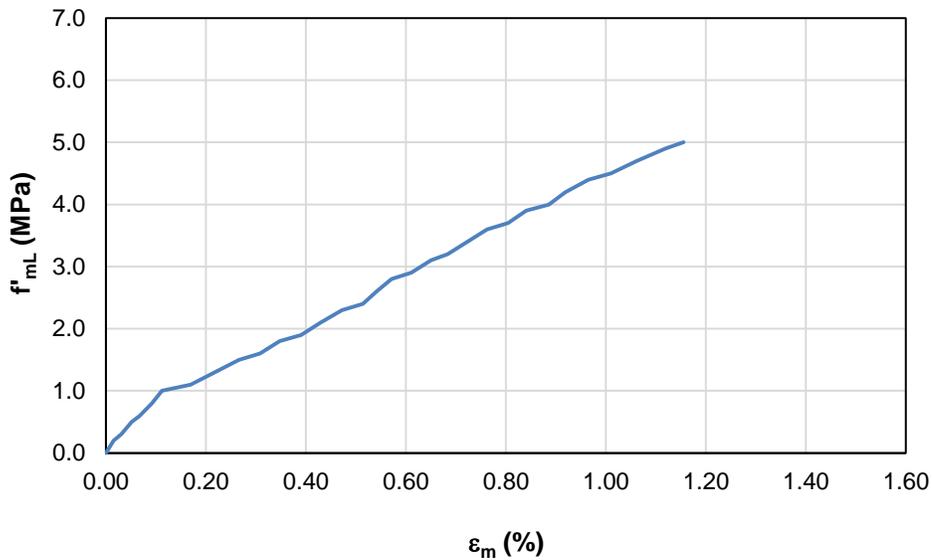


M3-1.5U-ME

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
1 766	0.000000	0.0000	0.0	156 960	0.005413	0.5413	2.6
9 810	0.000151	0.0151	0.2	166 770	0.005715	0.5715	2.8
19 620	0.000302	0.0302	0.3	176 580	0.006108	0.6108	2.9
29 430	0.000514	0.0514	0.5	186 390	0.006501	0.6501	3.1
39 240	0.000677	0.0677	0.6	196 200	0.006834	0.6834	3.2
49 050	0.000925	0.0925	0.8	206 010	0.007227	0.7227	3.4
58 860	0.001119	0.1119	1.0	215 820	0.007620	0.7620	3.6
68 670	0.001693	0.1693	1.1	225 630	0.008043	0.8043	3.7
78 480	0.002177	0.2177	1.3	235 440	0.008406	0.8406	3.9
88 290	0.002661	0.2661	1.5	245 250	0.008860	0.8860	4.0
98 100	0.003084	0.3084	1.6	255 060	0.009192	0.9192	4.2
107 910	0.003477	0.3477	1.8	264 870	0.009646	0.9646	4.4
117 720	0.003901	0.3901	1.9	274 680	0.010100	1.0100	4.5
127 530	0.004294	0.4294	2.1	284 490	0.010614	1.0614	4.7
137 340	0.004717	0.4717	2.3	294 300	0.011188	1.1188	4.9
147 150	0.005140	0.5140	2.4	304 110	0.011551	1.1551	5.0

0.05 f'_{mL} = 0.3 $\epsilon_{0.05}$ = 0.000302
0.33 f'_{mL} = 1.7 $\epsilon_{0.33}$ = 0.003281

E_m (MPa) = 470



Módulo elástico en muretes de unidad y media, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con barra de GFRP y curados en condiciones ambientales

M1-1.5U-BFRP

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
294	0.000000	0.0000	0.0	137 340	0.001603	0.1603	3.3
9 810	0.000121	0.0121	0.2	147 150	0.001754	0.1754	3.5
19 620	0.000181	0.0181	0.5	156 960	0.001905	0.1905	3.7
29 430	0.000363	0.0363	0.7	166 770	0.002056	0.2056	4.0
39 240	0.000514	0.0514	0.9	176 580	0.002298	0.2298	4.2
49 050	0.000605	0.0605	1.2	186 390	0.002510	0.2510	4.5
58 860	0.000635	0.0635	1.4	196 200	0.002721	0.2721	4.7
68 670	0.000665	0.0665	1.6	206 010	0.002963	0.2963	4.9
78 480	0.000665	0.0665	1.9	215 820	0.003145	0.3145	5.2
88 290	0.000726	0.0726	2.1	225 630	0.003387	0.3387	5.4
98 100	0.000847	0.0847	2.3	235 440	0.003659	0.3659	5.6
107 910	0.000907	0.0907	2.6	245 250	0.004052	0.4052	5.9
117 720	0.001058	0.1058	2.8	255 060	0.004324	0.4324	6.1
127 530	0.001391	0.1391	3.0	264 870	0.004717	0.4717	6.3

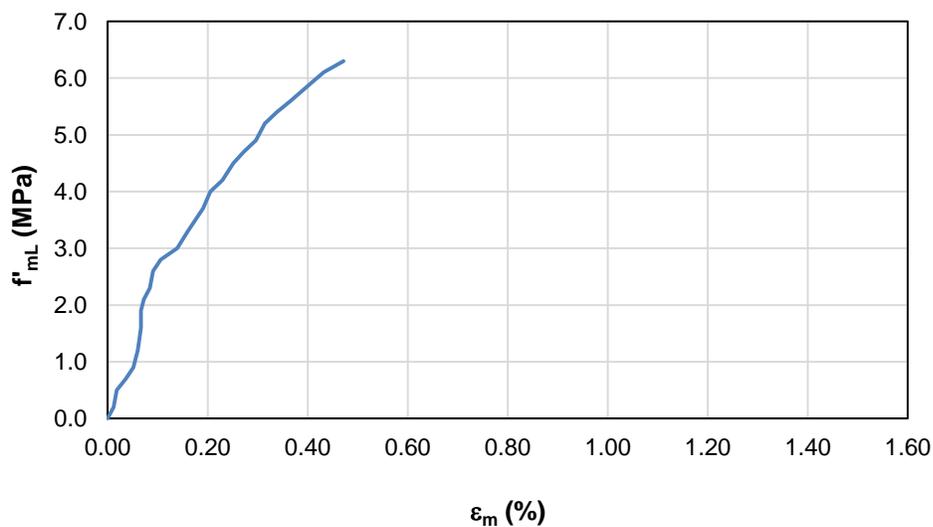
$$0.05 f'_{mL} = 0.4$$

$$\epsilon_{0.05} = 0.000161$$

$$0.33 f'_{mL} = 2.7$$

$$\epsilon_{0.33} = 0.000983$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{2800}$$

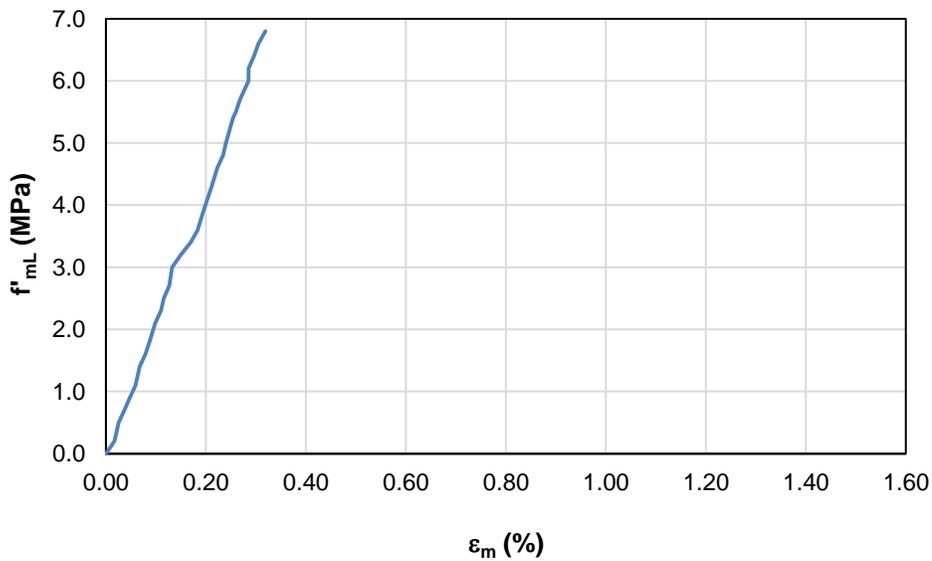


M2-1.5U-BFRP

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.0
9 810	0.000169	0.0169	0.2
19 620	0.000254	0.0254	0.5
29 430	0.000367	0.0367	0.7
39 240	0.000480	0.0480	0.9
49 050	0.000593	0.0593	1.1
58 860	0.000677	0.0677	1.4
68 670	0.000790	0.0790	1.6
78 480	0.000875	0.0875	1.8
88 290	0.000988	0.0988	2.1
98 100	0.001101	0.1101	2.3
107 910	0.001157	0.1157	2.5
117 720	0.001270	0.1270	2.7
127 530	0.001326	0.1326	3.0
137 340	0.001496	0.1496	3.2
147 150	0.001693	0.1693	3.4

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
156 960	0.001834	0.1834	3.6
166 770	0.001947	0.1947	3.9
176 580	0.002032	0.2032	4.1
186 390	0.002117	0.2117	4.3
196 200	0.002230	0.2230	4.6
206 010	0.002342	0.2342	4.8
215 820	0.002399	0.2399	5.0
230 535	0.002540	0.2540	5.4
235 440	0.002596	0.2596	5.5
245 250	0.002681	0.2681	5.7
259 965	0.002850	0.2850	6.0
264 870	0.002850	0.2850	6.2
274 680	0.002963	0.2963	6.4
284 490	0.003048	0.3048	6.6
294 300	0.003189	0.3189	6.8

0.05 f'_{mL}=	0.4	$\varepsilon_{0.05}$=	0.000226
0.33 f'_{mL}=	2.5	$\varepsilon_{0.33}$=	0.001157
E_m (MPa)=	<u>2255</u>		



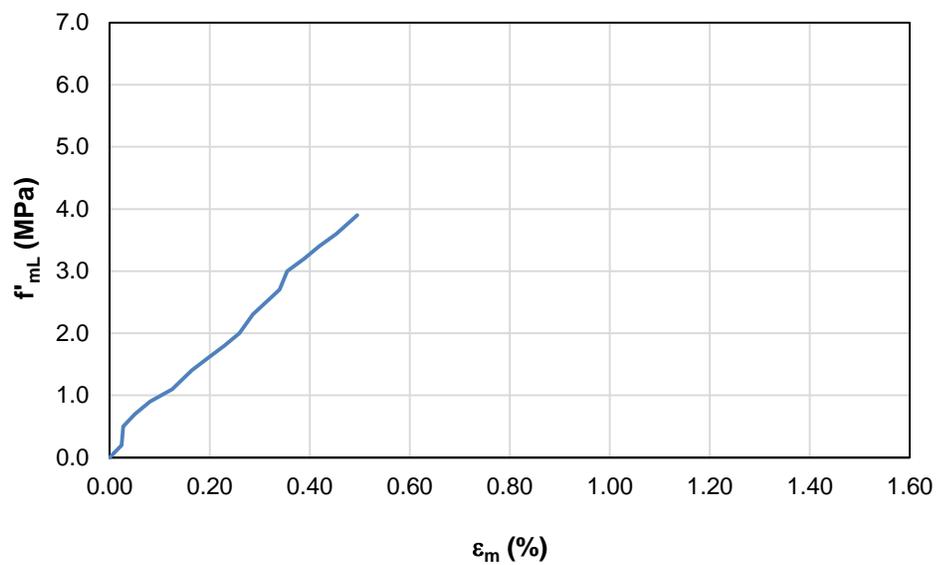
M3-1.5U-BFRP

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196	0.000000	0.0000	0.0	88 290	0.002594	0.2594	2.0
9 810	0.000238	0.0238	0.2	98 100	0.002862	0.2862	2.3
19 620	0.000268	0.0268	0.5	107 910	0.003130	0.3130	2.5
29 430	0.000507	0.0507	0.7	117 720	0.003399	0.3399	2.7
39 240	0.000805	0.0805	0.9	127 530	0.003548	0.3548	3.0
49 050	0.001252	0.1252	1.1	137 340	0.003888	0.3888	3.2
58 860	0.001640	0.1640	1.4	147 150	0.004186	0.4186	3.4
68 670	0.001968	0.1968	1.6	156 960	0.004531	0.4531	3.6
78 480	0.002296	0.2296	1.8	166 770	0.004949	0.4949	3.9

$$0.05 f'_{mL} = 0.2 \quad \varepsilon_{0.05} = 0.000238$$

$$0.33 f'_{mL} = 1.5 \quad \varepsilon_{0.33} = 0.001804$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{831}$$



**N. Anexo N: Resistencia a
compresión en muretes medianos**

Resistencia a compresión en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-MD-NR	45.6	53.2	25.3	1 346	0.94	397 599	2.8
M2-MD-NR	43.7	43.4	26.0	1 128	0.92	588 894	4.8
M3-MD-NR	44.3	53.6	25.6	1 372	0.92	482 652	3.2

Promedio 3.6
 Desviación 1.1
 Dispersión (%) 29.4

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-MD-ME	41.8	52.6	28.3	1 489	0.86	527386	3.0
M2-MD-ME	43.5	52.3	28.1	1 470	0.86	586049	3.4
M3-MD-ME	43.3	54.7	28.4	1 553	0.86	666001	3.7

Promedio 3.4
 Desviación 0.4
 Dispersión (%) 10.4

f_e: Factor de corrección por esbeltez

Resistencia a compresión en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A (cm ²)	f _e	Carga (N)	f' _{mL} (MPa)
	Alto	Largo	Espesor				
M1-MD-BFRP	41.5	53.0	25.0	1 325	0.92	555 050	3.9
M2-MD-BFRP	41.8	53.5	25.5	1 364	0.89	427 029	2.8
M3-MD-BFRP	43.4	53.8	25.8	1 388	0.92	681 893	4.5

Promedio 3.7

Desviación 0.9

Dispersión (%) 23.1

f_e: Factor de corrección por esbeltez

O. Anexo O: Módulo elástico en muretes medianos

Módulo elástico en muretes medianos, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

M1-MD-NR

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
628	0.000000	0.0000	0.0
14 715	0.000030	0.0030	0.1
29 430	0.000060	0.0060	0.2
44 145	0.000137	0.0137	0.3
58 860	0.000268	0.0268	0.4
73 575	0.000417	0.0417	0.5
88 290	0.000626	0.0626	0.6
103 005	0.000835	0.0835	0.7
117 720	0.001014	0.1014	0.8
132 435	0.001192	0.1192	0.9
147 150	0.001461	0.1461	1.0
161 865	0.001729	0.1729	1.1
176 580	0.003339	0.3339	1.2
191 295	0.003816	0.3816	1.3

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
206 010	0.004174	0.4174	1.4
220 725	0.004651	0.4651	1.5
235 440	0.005008	0.5008	1.6
250 155	0.005605	0.5605	1.7
264 870	0.006082	0.6082	1.8
279 585	0.006559	0.6559	2.0
294 300	0.006916	0.6916	2.1
309 015	0.007513	0.7513	2.2
323 730	0.008109	0.8109	2.3
338 445	0.008705	0.8705	2.4
353 160	0.009659	0.9659	2.5
367 875	0.010613	1.0613	2.6
382 590	0.011448	1.1448	2.7

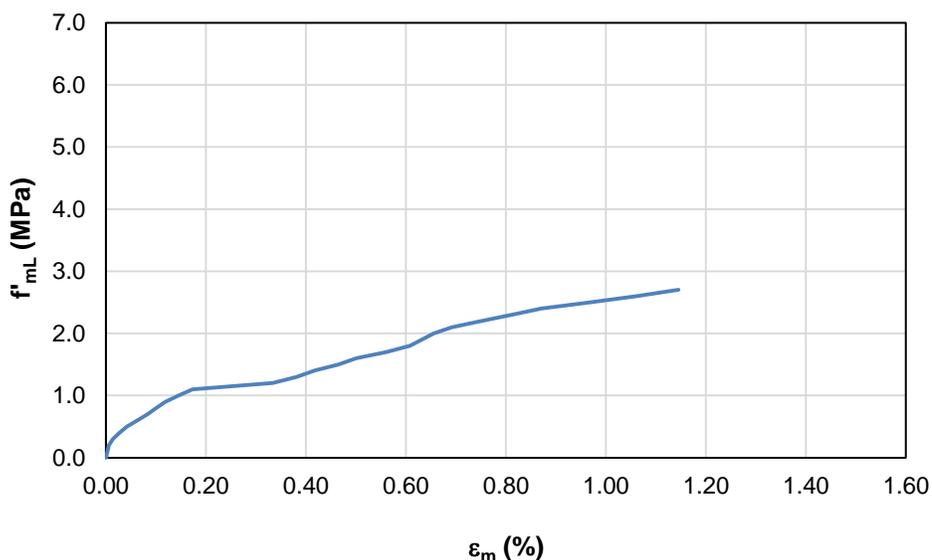
$0.05 f'_{mL} = 0.1$

$\epsilon_{0.05} = 0.000030$

$0.33 f'_{mL} = 0.9$

$\epsilon_{0.33} = 0.001192$

E_m (MPa) = 688

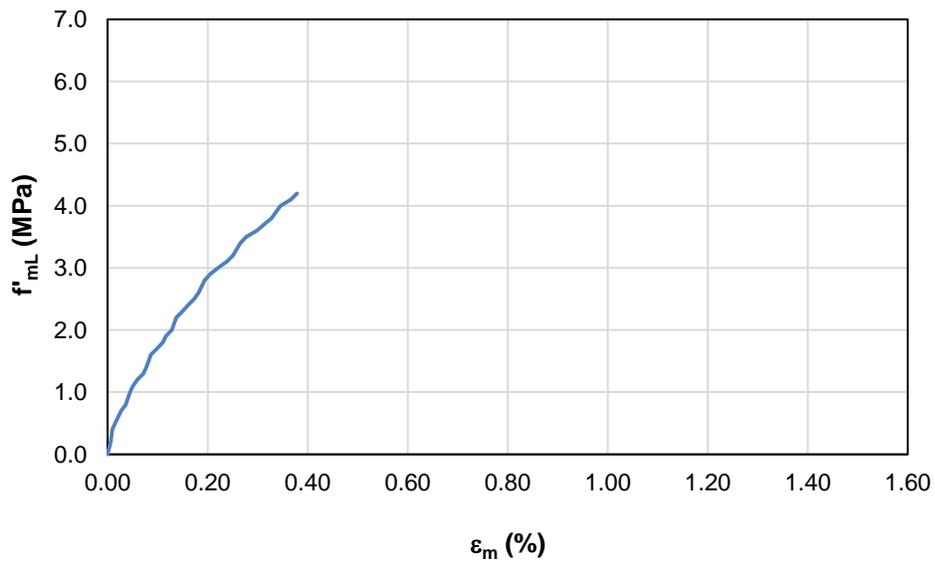


M2-MD-NR

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
628	0.000000	0.0000	0.0	264 870	0.001371	0.1371	2.2
14 715	0.000030	0.0030	0.1	279 585	0.001491	0.1491	2.3
29 430	0.000060	0.0060	0.2	294 300	0.001610	0.1610	2.4
44 145	0.000089	0.0089	0.4	309 015	0.001729	0.1729	2.5
58 860	0.000149	0.0149	0.5	323 730	0.001819	0.1819	2.6
73 575	0.000209	0.0209	0.6	338 445	0.001938	0.1938	2.8
88 290	0.000268	0.0268	0.7	353 160	0.002057	0.2057	2.9
103 005	0.000358	0.0358	0.8	367 875	0.002206	0.2206	3.0
117 720	0.000447	0.0447	1.0	382 590	0.002385	0.2385	3.1
132 435	0.000507	0.0507	1.1	397 305	0.002504	0.2504	3.2
147 150	0.000596	0.0596	1.2	412 020	0.002653	0.2653	3.4
161 865	0.000715	0.0715	1.3	426 735	0.002773	0.2773	3.5
176 580	0.000775	0.0775	1.4	441 450	0.002981	0.2981	3.6
191 295	0.000865	0.0865	1.6	456 165	0.003130	0.3130	3.7
206 010	0.000984	0.0984	1.7	470 880	0.003279	0.3279	3.8
220 725	0.001103	0.1103	1.8	485 595	0.003458	0.3458	4.0
235 440	0.001163	0.1163	1.9	500 310	0.003667	0.3667	4.1
250 155	0.001282	0.1282	2.0	515 025	0.003786	0.3786	4.2

$0.05 f'_{mL} = 0.2$ $\epsilon_{0.05} = 0.000060$
 $0.33 f'_{mL} = 1.6$ $\epsilon_{0.33} = 0.000865$

E_m (MPa)= 1739

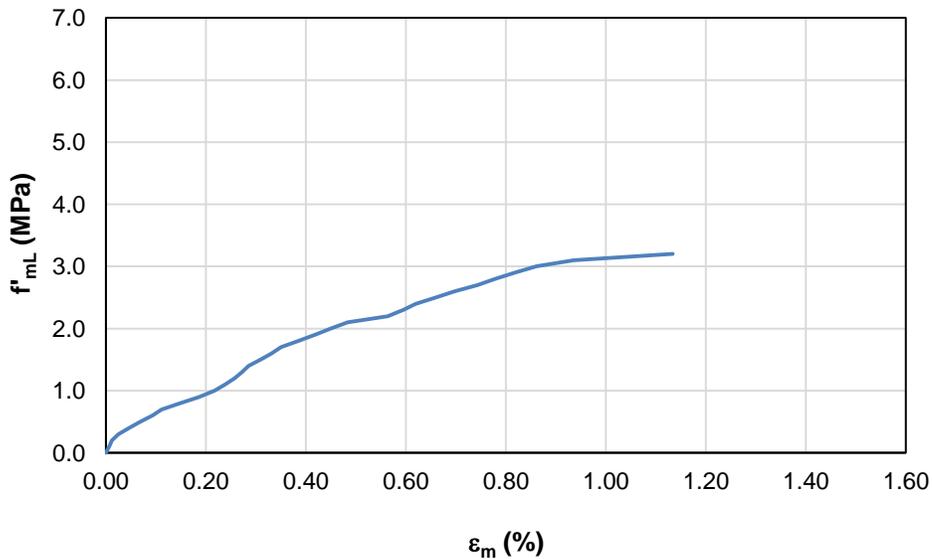


M3-MD-NR

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
628	0.000000	0.0000	0.0	250 155	0.003500	0.3500	1.7
14 715	0.000062	0.0062	0.1	264 870	0.003841	0.3841	1.8
29 430	0.000124	0.0124	0.2	279 585	0.004185	0.4185	1.9
44 145	0.000248	0.0248	0.3	294 300	0.004491	0.4491	2.0
58 860	0.000465	0.0465	0.4	309 015	0.004832	0.4832	2.1
73 575	0.000681	0.0681	0.5	323 730	0.005638	0.5638	2.2
88 290	0.000929	0.0929	0.6	338 445	0.005947	0.5947	2.3
103 005	0.001115	0.1115	0.7	353 160	0.006195	0.6195	2.4
117 720	0.001487	0.1487	0.8	367 875	0.006598	0.6598	2.5
132 435	0.001859	0.1859	0.9	382 590	0.006970	0.6970	2.6
147 150	0.002168	0.2168	1.0	397 305	0.007434	0.7434	2.7
161 865	0.002385	0.2385	1.1	412 020	0.007775	0.7775	2.8
176 580	0.002571	0.2571	1.2	426 735	0.008178	0.8178	2.9
191 295	0.002726	0.2726	1.3	441 450	0.008611	0.8611	3.0
206 010	0.002850	0.2850	1.4	456 165	0.009355	0.9355	3.1
220 725	0.003098	0.3098	1.5	470 880	0.011337	1.1337	3.2
235 440	0.003314	0.3314	1.6				

$0.05 f'_{mL} = 0.2$ $\varepsilon_{0.05} = 0.000124$
 $0.33 f'_{mL} = 1.1$ $\varepsilon_{0.33} = 0.002385$

E_m (MPa) = 398



Módulo elástico en muretes medianos, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

M1-MD-ME

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
628	0.000000	0.0000	0.0
14 715	0.000000	0.0000	0.1
29 430	0.000177	0.0177	0.2
44 145	0.000413	0.0413	0.3
58 860	0.000679	0.0679	0.3
73 575	0.001063	0.1063	0.4
88 290	0.001418	0.1418	0.5
103 005	0.001949	0.1949	0.6
117 720	0.002422	0.2422	0.7
132 435	0.002481	0.2481	0.8
147 150	0.002658	0.2658	0.9
161 865	0.003131	0.3131	0.9
176 580	0.003603	0.3603	1.0
191 295	0.004194	0.4194	1.1
206 010	0.004578	0.4578	1.2
220 725	0.004932	0.4932	1.3
235 440	0.005169	0.5169	1.4
250 155	0.005523	0.5523	1.4

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
264 870	0.005907	0.5907	1.5
279 585	0.006320	0.6320	1.6
294 300	0.006793	0.6793	1.7
309 015	0.007295	0.7295	1.8
323 730	0.007856	0.7856	1.9
338 445	0.008388	0.8388	2.0
353 160	0.008979	0.8979	2.0
367 875	0.009510	0.9510	2.1
382 590	0.010042	1.0042	2.2
397 305	0.010514	1.0514	2.3
412 020	0.011194	1.1194	2.4
426 735	0.011637	1.1637	2.5
441 450	0.012168	1.2168	2.6
456 165	0.013025	1.3025	2.6
470 880	0.013940	1.3940	2.7
485 595	0.014974	1.4974	2.8
490 500	0.015358	1.5358	2.8

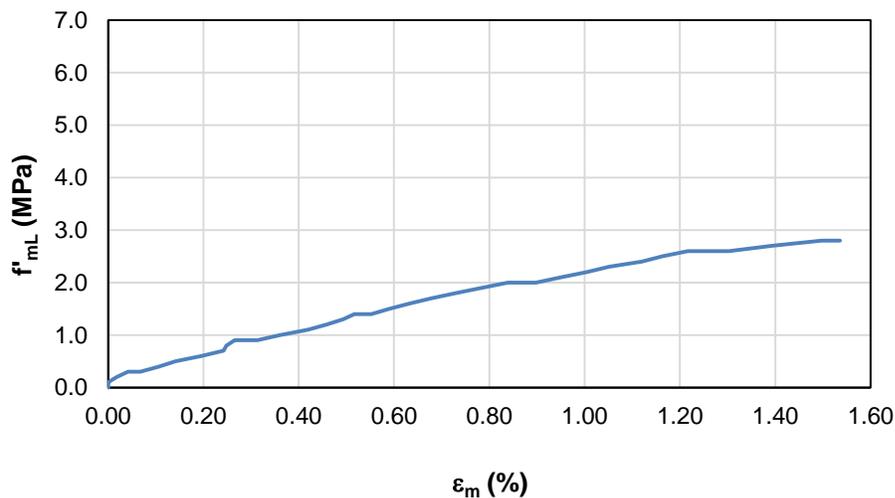
$$0.05 f'_{mL} = 0.2$$

$$\epsilon_{0.05} = 0.000177$$

$$0.33 f'_{mL} = 1$$

$$\epsilon_{0.33} = 0.003603$$

$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{234}$$



M2-MD-ME

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
628	0.000000	0.0000	0.0	250 155	0.002389	0.2389	1.5
14 715	0.000000	0.0000	0.1	264 870	0.002661	0.2661	1.5
29 430	0.000121	0.0121	0.2	279 585	0.002903	0.2903	1.6
44 145	0.000151	0.0151	0.3	294 300	0.003054	0.3054	1.7
58 860	0.000181	0.0181	0.3	309 015	0.003266	0.3266	1.8
73 575	0.000302	0.0302	0.4	323 730	0.003387	0.3387	1.9
88 290	0.000363	0.0363	0.5	338 445	0.003508	0.3508	2.0
103 005	0.000514	0.0514	0.6	353 160	0.003750	0.3750	2.1
117 720	0.000635	0.0635	0.7	367 875	0.004445	0.4445	2.2
132 435	0.000847	0.0847	0.8	382 590	0.005201	0.5201	2.2
147 150	0.000998	0.0998	0.9	397 305	0.008104	0.8104	2.3
161 865	0.001210	0.1210	0.9	412 020	0.009676	0.9676	2.4
176 580	0.001451	0.1451	1.0	431 640	0.011007	1.1007	2.5
191 295	0.001572	0.1572	1.1	451 260	0.012156	1.2156	2.6
206 010	0.001784	0.1784	1.2	470 880	0.012700	1.2700	2.8
220 725	0.001996	0.1996	1.3	490 500	0.013123	1.3123	2.9
235 440	0.002147	0.2147	1.4	510 120	0.013305	1.3305	3.0

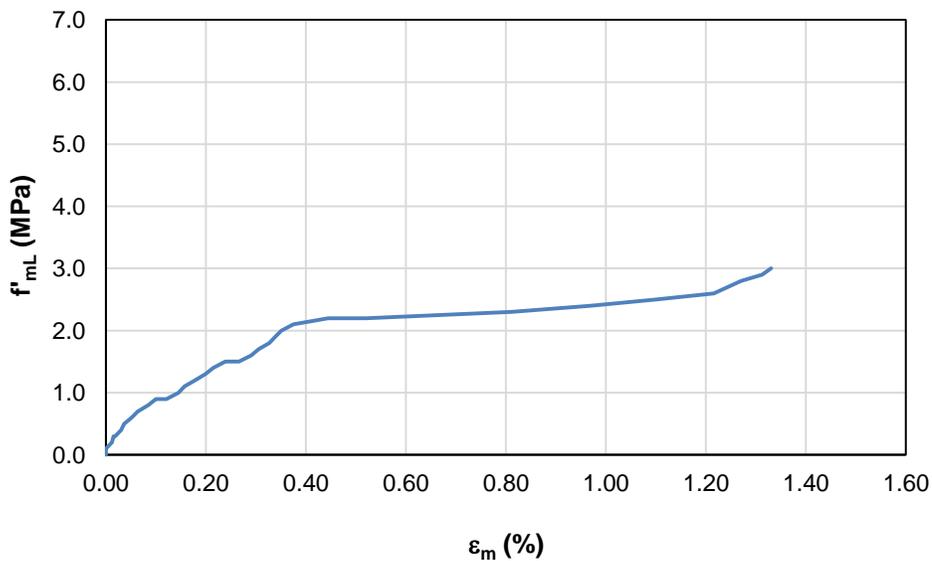
$0.05 f'_{mL} = 0.2$

$\varepsilon_{0.05} = 0.000121$

$0.33 f'_{mL} = 1.1$

$\varepsilon_{0.33} = 0.001572$

E_m (MPa) = 620

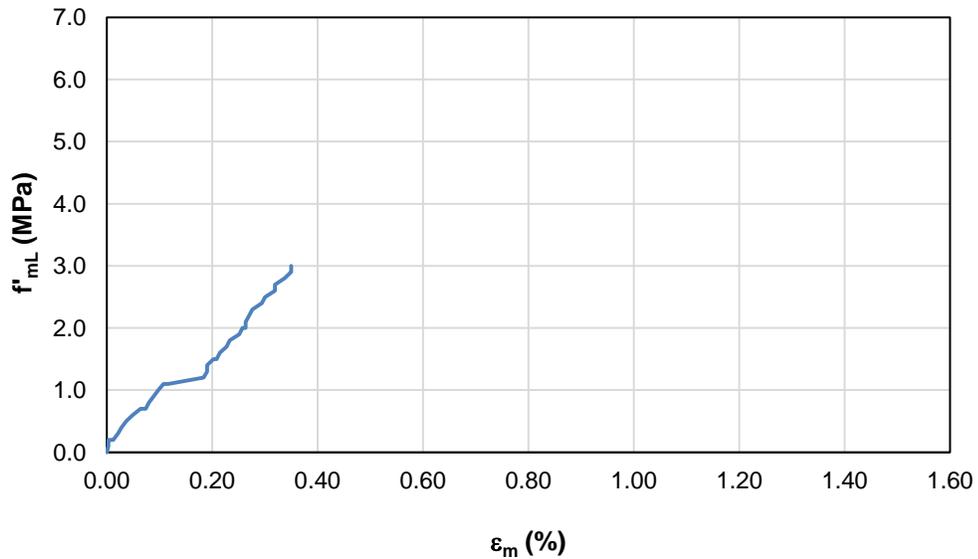


M3-MD-ME

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
726	0.000000	0.0000	0.0	264 870	0.002025	0.2025	1.5
14 715	0.000031	0.0031	0.1	279 585	0.002086	0.2086	1.5
29 430	0.000031	0.0031	0.2	294 300	0.002147	0.2147	1.6
44 145	0.000123	0.0123	0.2	309 015	0.002270	0.2270	1.7
58 860	0.000215	0.0215	0.3	323 730	0.002331	0.2331	1.8
73 575	0.000276	0.0276	0.4	338 445	0.002515	0.2515	1.9
88 290	0.000368	0.0368	0.5	353 160	0.002577	0.2577	2.0
103 005	0.000491	0.0491	0.6	367 875	0.002638	0.2638	2.0
117 720	0.000644	0.0644	0.7	382 590	0.002638	0.2638	2.1
132 435	0.000736	0.0736	0.7	397 305	0.002700	0.2700	2.2
147 150	0.000798	0.0798	0.8	412 020	0.002761	0.2761	2.3
161 865	0.000890	0.0890	0.9	431 640	0.002945	0.2945	2.4
176 580	0.000982	0.0982	1.0	451 260	0.003006	0.3006	2.5
191 295	0.001074	0.1074	1.1	470 880	0.003190	0.3190	2.6
206 010	0.001166	0.1166	1.1	490 500	0.003190	0.3190	2.7
220 725	0.001841	0.1841	1.2	510 120	0.003374	0.3374	2.8
235 440	0.001902	0.1902	1.3	529 740	0.003497	0.3497	2.9
250 155	0.001902	0.1902	1.4	549 360	0.003497	0.3497	3.0

$0.05 f'_{mL} = 0.2$ $\epsilon_{0.05} = 0.000031$
 $0.33 f'_{mL} = 1.2$ $\epsilon_{0.33} = 0.001841$

E_m (MPa) = 553



Módulo elástico en muretes medianos, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con barra de GFRP y curados en condiciones ambientales

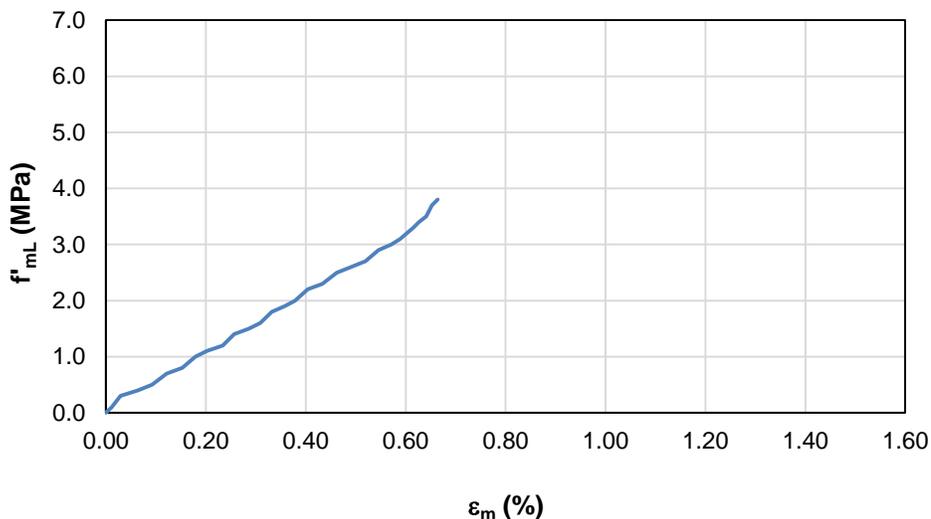
M1-MD-BFRP

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
765	0.000000	0.0000	0.0	294 300	0.003781	0.3781	2.0
19 620	0.000115	0.0115	0.1	313 920	0.004041	0.4041	2.2
39 240	0.000289	0.0289	0.3	333 540	0.004330	0.4330	2.3
58 860	0.000635	0.0635	0.4	353 160	0.004618	0.4618	2.5
78 480	0.000924	0.0924	0.5	372 780	0.004907	0.4907	2.6
98 100	0.001212	0.1212	0.7	392 400	0.005195	0.5195	2.7
117 720	0.001530	0.1530	0.8	412 020	0.005455	0.5455	2.9
137 340	0.001790	0.1790	1.0	431 640	0.005715	0.5715	3.0
156 960	0.002020	0.2020	1.1	451 260	0.005888	0.5888	3.1
176 580	0.002338	0.2338	1.2	470 880	0.006148	0.6148	3.3
196 200	0.002569	0.2569	1.4	490 500	0.006263	0.6263	3.4
215 820	0.002858	0.2858	1.5	510 120	0.006408	0.6408	3.5
235 440	0.003088	0.3088	1.6	529 740	0.006523	0.6523	3.7
255 060	0.003319	0.3319	1.8	549 360	0.006639	0.6639	3.8
274 680	0.003579	0.3579	1.9				

$$0.05 f'_{mL} = 0.2 \quad \epsilon_{0.05} = 0.000202$$

$$0.33 f'_{mL} = 1.3 \quad \epsilon_{0.33} = 0.002453$$

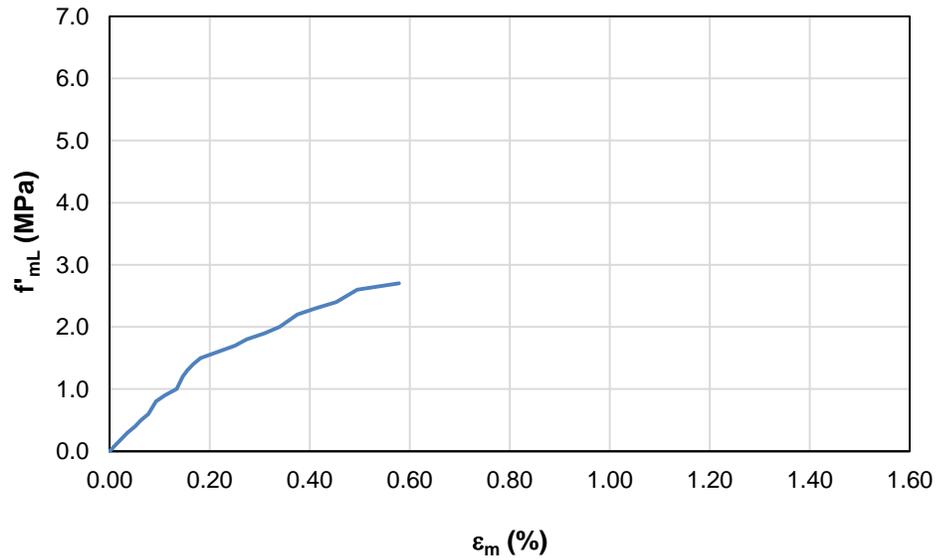
$$E_m \text{ (MPa)} = \underline{489}$$



M2-MD-BFRP

Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)	Carga (N)	ϵ (mm/mm)	ϵ (%)	f'_{mL} (MPa)
1 128	0.000000	0.0000	0.0	215 820	0.001669	0.1669	1.4
19 620	0.000119	0.0119	0.1	235 440	0.001819	0.1819	1.5
39 240	0.000358	0.0358	0.3	255 060	0.002504	0.2504	1.7
58 860	0.000507	0.0507	0.4	274 680	0.002743	0.2743	1.8
78 480	0.000626	0.0626	0.5	294 300	0.003100	0.3100	1.9
98 100	0.000775	0.0775	0.6	313 920	0.003399	0.3399	2.0
117 720	0.000924	0.0924	0.8	333 540	0.003756	0.3756	2.2
137 340	0.001103	0.1103	0.9	353 160	0.004114	0.4114	2.3
156 960	0.001342	0.1342	1.0	372 780	0.004531	0.4531	2.4
176 580	0.001461	0.1461	1.2	392 400	0.004949	0.4949	2.6
196 200	0.001550	0.1550	1.3	412 020	0.005784	0.5784	2.7

0.05 f'_{mL} = 0.1 **$\epsilon_{0.05}$ = 0.000119**
0.33 f'_{mL} = 0.9 **$\epsilon_{0.33}$ = 0.001103**
 E_m (MPa) = 813



M3-MD-BFRP

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
981	0.000000	0.0000	0.0
19 620	0.000030	0.0030	0.1
39 240	0.000151	0.0151	0.3
58 860	0.000212	0.0212	0.4
78 480	0.000272	0.0272	0.5
98 100	0.000393	0.0393	0.7
117 720	0.000514	0.0514	0.8
137 340	0.000635	0.0635	0.9
156 960	0.000847	0.0847	1.0
176 580	0.000968	0.0968	1.2

Carga (N)	ε (mm/mm)	ε (%)	f'_{mL} (MPa)
196 200	0.001179	0.1179	1.3
215 820	0.001355	0.1355	1.4
235 440	0.001512	0.1512	1.6
255 060	0.001699	0.1699	1.7
274 680	0.001905	0.1905	1.8
294 300	0.002141	0.2141	2.0
313 920	0.002262	0.2262	2.1
333 540	0.002389	0.2389	2.2
353 160	0.002419	0.2419	2.3

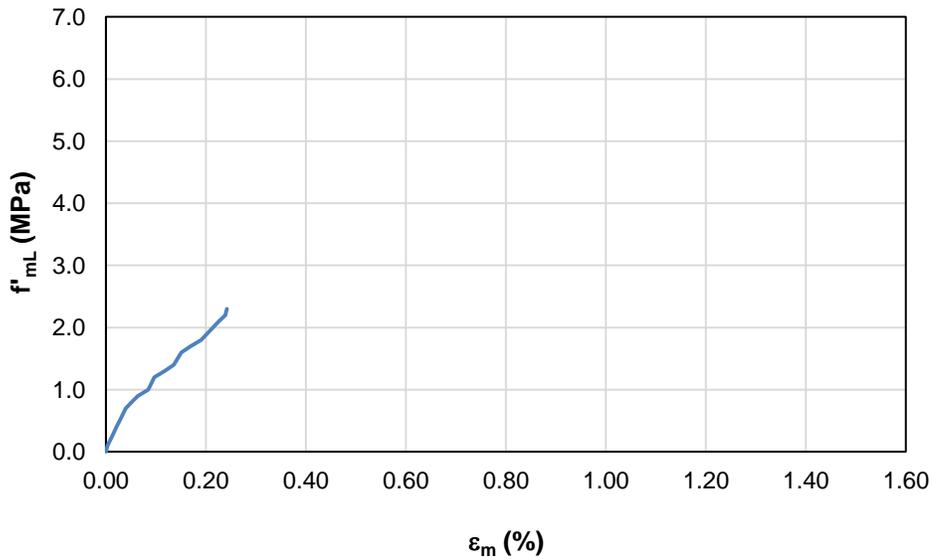
0.05 f'_{mL} = 0.2

$\varepsilon_{0.05}$ = 0.000091

0.33 f'_{mL} = 1.5

$\varepsilon_{0.33}$ = 0.001530

E_m (MPa) = 903



**P. Anexo P: Esfuerzo cortante por
compresión diagonal en muretes
grandes**

Resistencia a compresión diagonal en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A _n (cm ²)	Carga (N)	S _s (MPa)
	Alto	Largo	Espesor			
M1-GD-NR	109.0	107.0	24.2	2 614	45 218	0.122
M2-GD-NR	110.0	107.5	25.5	2 773	35 373	0.09
M3-GD-NR	111.5	105.0	25.5	2 760	38 568	0.099

Promedio 0.104
 Desviación 0.017
 Dispersión (%) 15.9

Resistencia a compresión diagonal en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A _n (cm ²)	Carga (N)	S _s (MPa)
	Alto	Largo	Espesor			
M1-GD-ME	108.3	107.6	27.0	2 915	45 554	0.110
M2-GD-ME	108.5	107.6	28.5	3 079	46 753	0.107
M3-GD-ME	108.0	107.5	26.0	2 802	37 939	0.096

Promedio 0.104
 Desviación 0.007
 Dispersión (%) 7.1

Resistencia a compresión diagonal en muretes medianos, elaborados con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados y con barras de GFRP y curados en condiciones ambientales

Muestra	Dimensiones (cm)			A _n (cm ²)	Carga (N)	S _s (MPa)
	Alto	Largo	Espesor			
M1-GD-BFRP	109.0	107.0	24.2	2 614	43 041	0.116
M2-GD-BFRP	110.0	107.5	25.5	2 773	44 492	0.113
M3-GD-BFRP	111.5	105.0	25.5	2 760	36 985	0.095

Promedio 0.108
Desviación 0.011
Dispersión (%) 10.5

Q. Anexo Q: Módulo de rigidez a cortante en muretes grandes

Módulo de rigidez a corte en muretes medianos, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, no reforzados y curados en condiciones ambientales

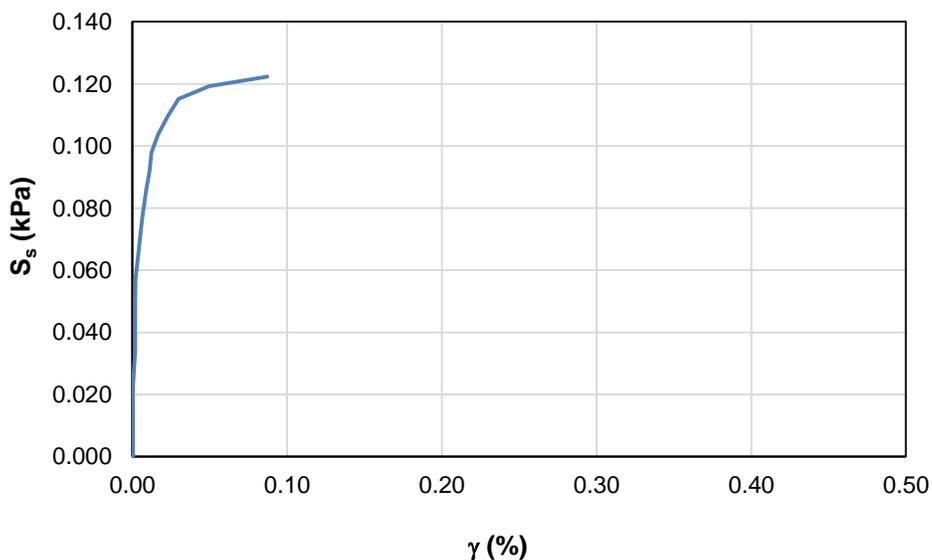
M1-GD-NR

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)	Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000	15 373	0.000017	0.0017	0.042
26	0.000002	0.0002	0.000	18 324	0.000017	0.0017	0.050
26	0.000003	0.0003	0.000	21 095	0.000020	0.0020	0.057
26	0.000003	0.0003	0.000	28 360	0.000063	0.0063	0.077
26	0.000003	0.0003	0.000	31 612	0.000087	0.0087	0.086
3 242	0.000003	0.0003	0.009	33 958	0.000110	0.0110	0.092
4 466	0.000003	0.0003	0.012	36 221	0.000123	0.0123	0.098
6 428	0.000003	0.0003	0.017	38 377	0.000165	0.0165	0.104
6 399	0.000003	0.0003	0.017	40 564	0.000230	0.0230	0.110
8 307	0.000003	0.0003	0.022	42 582	0.000298	0.0298	0.115
10 214	0.000008	0.0008	0.028	44 065	0.000495	0.0495	0.119
12 490	0.000017	0.0017	0.034	45 218	0.000872	0.0872	0.122

$$S_{1/3} = 0.041$$

$$\gamma_{1/3} = 0.000017$$

$$G_{1/3} \text{ (MPa)} = \underline{2446}$$



M2-GD-NR

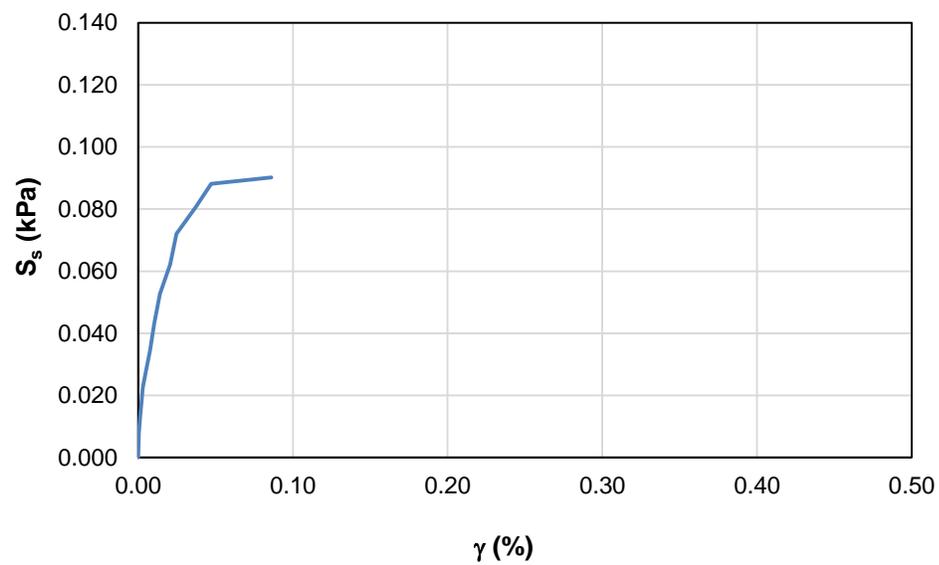
Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000
3	0.000000	0.0000	0.000
3	0.000000	0.0000	0.000
349	0.000000	0.0000	0.001
3 119	0.000005	0.0005	0.008
5 230	0.000012	0.0012	0.013
6 893	0.000020	0.0020	0.018
8 767	0.000030	0.0030	0.022
10 901	0.000050	0.0050	0.028

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
13 514	0.000077	0.0077	0.034
16 906	0.000103	0.0103	0.043
20 651	0.000140	0.0140	0.053
24 360	0.000207	0.0207	0.062
28 239	0.000247	0.0247	0.072
31 612	0.000372	0.0372	0.081
34 578	0.000472	0.0472	0.088
35 373	0.000860	0.0860	0.090

$$S_{1/3} = 0.030$$

$$\gamma_{1/3} = 0.000064$$

$$G_{1/3} \text{ (MPa)} = 471$$



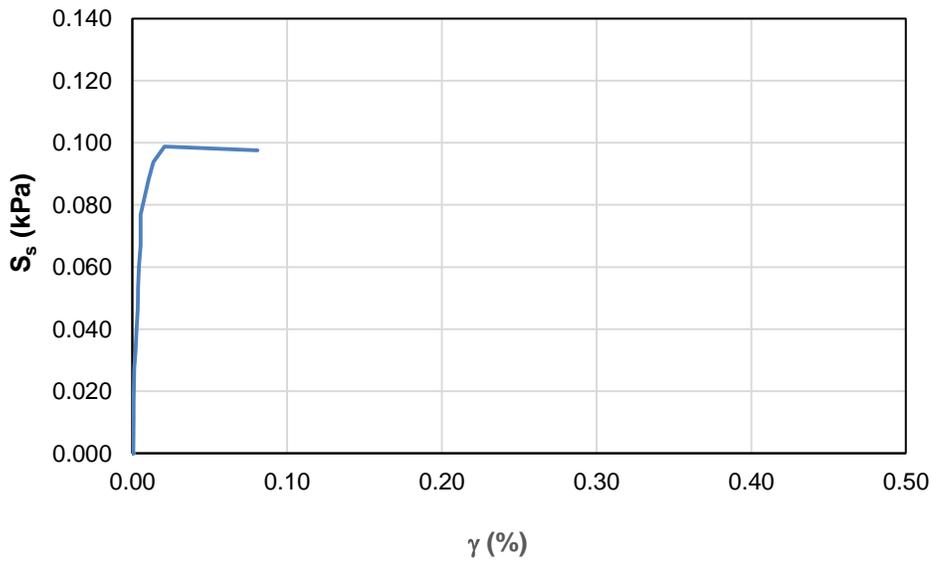
M3-GD-NR

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)	Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000	18 149	0.000035	0.0035	0.046
3	0.000010	0.0010	0.000	20 870	0.000037	0.0037	0.053
3	0.000002	0.0002	0.000	23 639	0.000042	0.0042	0.061
82	0.000005	0.0005	0.000	26 148	0.000052	0.0052	0.067
4 549	0.000007	0.0007	0.012	28 169	0.000053	0.0053	0.072
6 275	0.000008	0.0008	0.016	30 025	0.000053	0.0053	0.077
8 551	0.000008	0.0008	0.022	34 403	0.000105	0.0105	0.088
10 726	0.000012	0.0012	0.027	36 593	0.000135	0.0135	0.094
12 836	0.000019	0.0019	0.033	38 568	0.000207	0.0207	0.099
15 360	0.000027	0.0027	0.039	38 087	0.000808	0.0808	0.098

$S_{1/3} = 0.033$

$\gamma_{1/3} = 0.000019$

$G_{1/3}$ (MPa) = 1712



Módulo de rigidez a corte en muretes medianos, construidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con malla electrosoldada y curados en condiciones ambientales

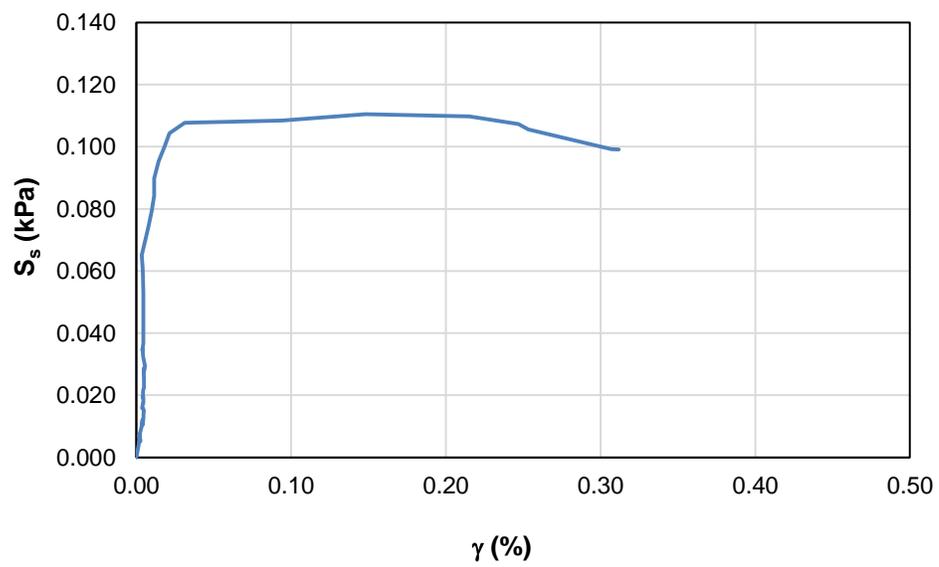
M1-GD-ME

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)	Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000	11 519	0.000047	0.0047	0.028
2 055	0.000018	0.0018	0.005	11 866	0.000048	0.0048	0.029
2 113	0.000023	0.0023	0.005	11 488	0.000048	0.0048	0.028
2 240	0.000025	0.0025	0.005	11 532	0.000047	0.0047	0.028
2 268	0.000025	0.0025	0.006	11 554	0.000051	0.0051	0.028
2 265	0.000025	0.0025	0.005	12 133	0.000055	0.0055	0.029
2 650	0.000022	0.0022	0.006	13 437	0.000042	0.0042	0.033
2 510	0.000020	0.0020	0.006	14 155	0.000040	0.0040	0.034
3 028	0.000018	0.0018	0.007	14 342	0.000038	0.0038	0.035
2 837	0.000020	0.0020	0.007	14 278	0.000038	0.0038	0.035
2 980	0.000020	0.0020	0.007	15 165	0.000043	0.0043	0.037
4 627	0.000040	0.0040	0.011	17 073	0.000043	0.0043	0.041
4 996	0.000040	0.0040	0.012	19 508	0.000044	0.0044	0.047
4 834	0.000037	0.0037	0.012	21 771	0.000045	0.0045	0.053
4 274	0.000037	0.0037	0.010	23 555	0.000043	0.0043	0.057
4 322	0.000040	0.0040	0.010	25 046	0.000040	0.0040	0.061
5 111	0.000043	0.0043	0.012	26 842	0.000035	0.0035	0.065
6 124	0.000046	0.0046	0.015	30 444	0.000075	0.0075	0.074
6 211	0.000048	0.0048	0.015	32 608	0.000098	0.0098	0.079
6 509	0.000043	0.0043	0.016	34 722	0.000113	0.0113	0.084
6 544	0.000037	0.0037	0.016	37 021	0.000115	0.0115	0.090
7 196	0.000042	0.0042	0.017	39 314	0.000143	0.0143	0.095
7 228	0.000043	0.0043	0.018	41 284	0.000182	0.0182	0.100
7 876	0.000043	0.0043	0.019	43 033	0.000213	0.0213	0.104
7 876	0.000042	0.0042	0.019	44 413	0.000312	0.0312	0.108
8 099	0.000042	0.0042	0.020	44 689	0.000942	0.0942	0.108
8 058	0.000042	0.0042	0.020	45 535	0.001482	0.1482	0.110
8 773	0.000042	0.0042	0.021	45 233	0.002152	0.2152	0.110
9 043	0.000045	0.0045	0.022	44 231	0.002470	0.2470	0.107
9 217	0.000048	0.0048	0.022	43 526	0.002533	0.2533	0.106
9 268	0.000048	0.0048	0.022	40 903	0.003070	0.3070	0.099
10 019	0.000048	0.0048	0.024	40 874	0.003117	0.3117	0.099

$$S_{1/3} = 0.037$$

$$\gamma_{1/3} = 0.000043$$

$$G_{1/3} \text{ (MPa)} = \underline{850}$$



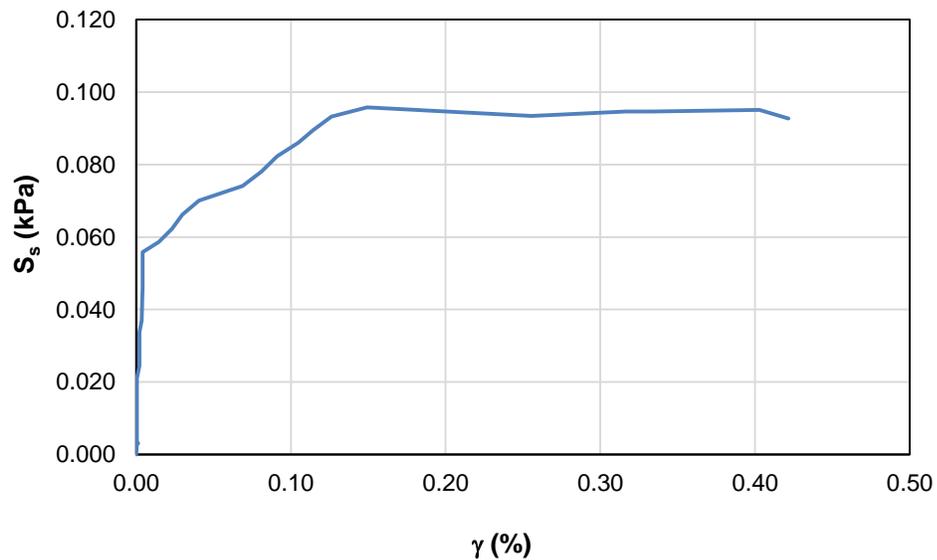
M3-GD-ME

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)	Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000	22 111	0.000042	0.0042	0.056
1 177	0.000005	0.0005	0.003	23 223	0.000147	0.0147	0.059
1 203	0.000012	0.0012	0.003	24 654	0.000232	0.0232	0.062
1 346	0.000005	0.0005	0.003	26 244	0.000298	0.0298	0.066
3 832	0.000005	0.0005	0.010	27 756	0.000407	0.0407	0.070
7 132	0.000005	0.0005	0.018	29 368	0.000688	0.0688	0.074
8 327	0.000005	0.0005	0.021	30 933	0.000810	0.0810	0.078
9 713	0.000020	0.0020	0.025	32 579	0.000910	0.0910	0.082
11 092	0.000020	0.0020	0.028	34 092	0.001048	0.1048	0.086
12 218	0.000020	0.0020	0.031	35 446	0.001143	0.1143	0.089
13 359	0.000020	0.0020	0.034	36 960	0.001262	0.1262	0.093
14 650	0.000035	0.0035	0.037	37 939	0.001493	0.1493	0.096
15 870	0.000038	0.0038	0.040	37 007	0.002555	0.2555	0.093
17 203	0.000040	0.0040	0.043	37 513	0.003167	0.3167	0.095
18 236	0.000041	0.0041	0.046	37 498	0.003337	0.3337	0.095
19 535	0.000041	0.0041	0.049	37 691	0.004028	0.4028	0.095
20 826	0.000042	0.0042	0.053	36 722	0.004217	0.4217	0.093

$S_{1/3} = 0.032$

$\gamma_{1/3} = 0.000020$

$G_{1/3}$ (MPa) = 1596



Módulo de rigidez a corte en muretes medianos, contruidos con mortero de cal y arena adicionado con metacaolín, reforzados con barras de GFRP y curados en condiciones ambientales

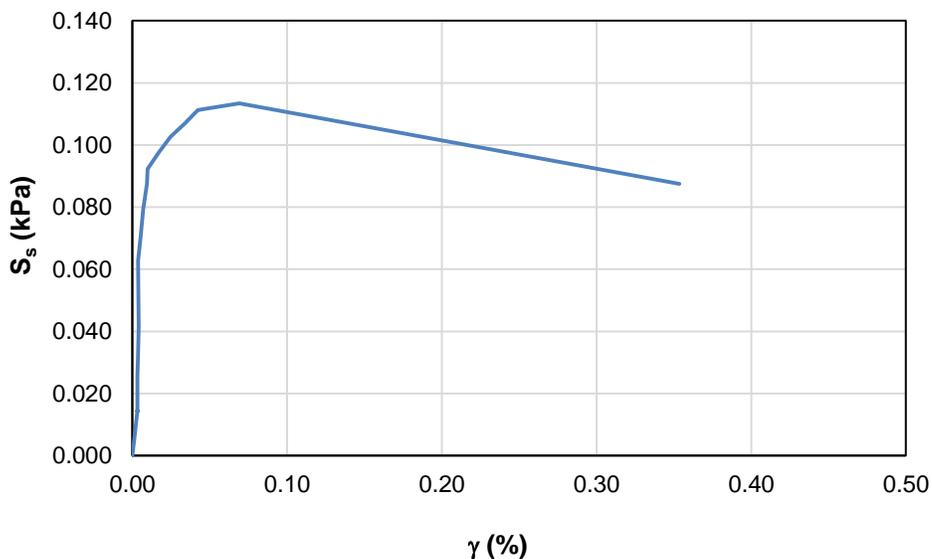
M2-GD-BFRP

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)	Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000	27 615	0.000053	0.0053	0.070
2 034	0.000012	0.0012	0.005	31 074	0.000070	0.0070	0.079
2 034	0.000012	0.0012	0.005	34 342	0.000093	0.0093	0.088
5 721	0.000032	0.0032	0.015	36 189	0.000098	0.0098	0.092
5 595	0.000032	0.0032	0.014	38 338	0.000172	0.0172	0.098
7 788	0.000032	0.0032	0.020	40 255	0.000247	0.0247	0.103
10 077	0.000032	0.0032	0.026	41 972	0.000338	0.0338	0.107
12 878	0.000036	0.0036	0.033	43 625	0.000423	0.0423	0.111
16 358	0.000040	0.0040	0.042	44 492	0.000690	0.0690	0.113
20 319	0.000038	0.0038	0.052	34 308	0.003535	0.3535	0.087
24 592	0.000037	0.0037	0.063				

$$S_{1/3} = 0.038$$

$$\gamma_{1/3} = 0.000041$$

$$G_{1/3} \text{ (MPa)} = \underline{919}$$



M3-GD-BFRP

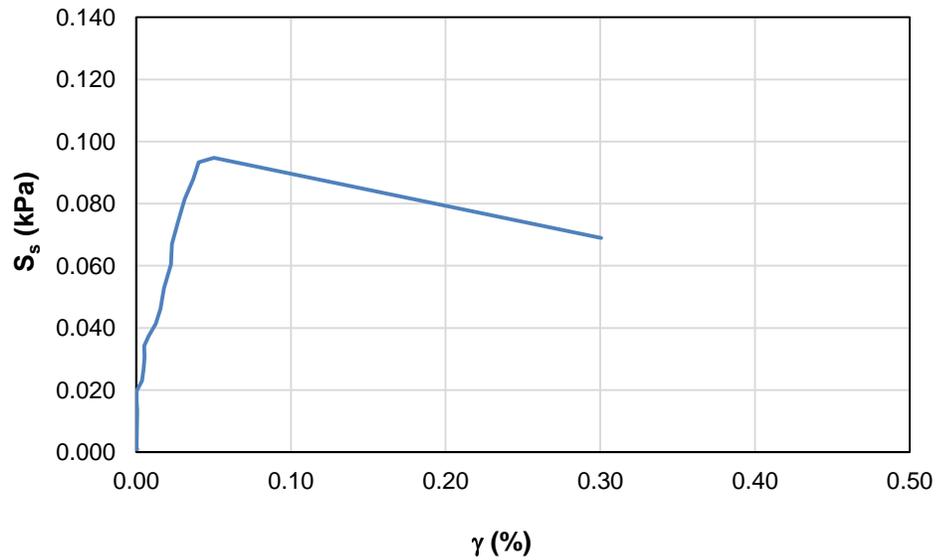
Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
0	0.000000	0.0000	0.000
356	0.000002	0.0002	0.001
356	0.000007	0.0007	0.001
397	0.000002	0.0002	0.001
5 284	0.000007	0.0007	0.014
6 480	0.000003	0.0003	0.017
7 693	0.000003	0.0003	0.020
8 968	0.000037	0.0037	0.023
10 427	0.000048	0.0048	0.027
11 877	0.000053	0.0053	0.030
13 352	0.000052	0.0052	0.034
14 592	0.000080	0.0080	0.037

Carga (N)	γ	γ (%)	S_s (MPa)
16 128	0.000125	0.0125	0.041
18 009	0.000157	0.0157	0.046
20 613	0.000178	0.0178	0.053
23 601	0.000225	0.0225	0.060
26 157	0.000230	0.0230	0.067
28 923	0.000270	0.0270	0.074
31 780	0.000313	0.0313	0.081
34 309	0.000368	0.0368	0.088
36 431	0.000403	0.0403	0.093
36 985	0.000503	0.0503	0.095
26 936	0.003005	0.3005	0.069

$S_{1/3} = 0.032$

$\gamma_{1/3} = 0.000053$

$G_{1/3}$ (MPa) = 600



R. Anexo R: Ficha técnica de la cal

	DEPOSITO LA CONCORDIA LTDA. MATERIALES PARA CONSTRUCCION NIT: 800.178.956-2 - IVA REGIMEN COMUN Bogotá, D.C. - Colombia PRINCIPAL: Cra. 3 No. 15A - 00 - Nueva Dirección: Cra. 3 Calle 12 D Bis (Esquina) Tels.: 281 35 82 - Telefax: 342 53 93 SUCURSAL: Calle 7 No. 2 - 23 Este - Tel.: 246 09 64 - Fax: 280 08 67
FICHA TECNICA	
PRODUCTO: CAL HIDRATADA, CAL APAGADA O XIDO DE CALCIO	
<p>Conocido también como cal apagada, es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido al reaccionar el oxido de calcio con agua. Consiste esencialmente hidróxido de calcio y magnesio, se ofrece en un porcentaje del 60% de Hidróxido de Calcio cumpliendo con la norma ICONTEC</p>	
GRANULOMETRIA: Se ofrecen en malla 120.	
PRESENTACIÓN: Sacos de 50 Kilos con empaque exterior de polipropileno y empaque interior de plástico; Big-bag de 1 Tonelada o estibada en unidades de 1.5 Toneladas.	
ALMACENAMIENTO: La cal hidratada se puede almacenar indefinidamente, siempre y cuando sea en lugares frescos y que el empaque se encuentre en buen estado.	
USOS La cal hidratada se utiliza para estabilización, cimentación y plasticidad de suelos	

S. Anexo S: Ficha técnica de las barras de GFRP

Characteristics of steel and composite reinforcement compared		
Characteristics	Glassfiber reinforcement	Metal reinforcement A-III (A400C)
Material	Glass roving bind by polymer on the base of epoxy resin	Steel
Maximum tensile stress, not less than, Mpa	1 000	390
Young's Modulus, Mpa	50 000	200 000
Unit extension, %	2,2	25
Heat conductance	0,35	46
Line expansion coefficient	from 9 to 12	from 13 to 15
Specific Gravity	1,9	7,8
Corrosion resistance	noncorrosive	corrosive
Thermal conductivity	nonconductive	conductive
Electric conductivity	dielectric	electrically conductive
Length	On the customer's request (in rods or coils)	Rods with length from 6 to 12 meters
Durability	Expected durability - 80 years	According to building regulation
Terms of substitution of steel reinforcement with composite reinforcement according to its properties	4 mm 6 mm 8 mm 10 mm 12 mm	8 AIII 10 AIII 12 AIII 14 AIII 16 AIII

Fuente: Tomado de <https://armastek.ru/en/composite-reinforcement/glassfiber-reinforcement/>

T. Anexo T: Protocolo de diseño de morteros de cal y arena

OBJETIVO:

Diseñar una mezcla de mortero, a base de cal apagada y arena.

HERRAMIENTAS A UTILIZAR:

- ✚ Mezcladora mecánica.
- ✚ Paleta mezcladora.
- ✚ Recipiente de mezcla.
- ✚ Raspador.
- ✚ Balanza.

MATERIALES:

- ✚ Cal apagada.
- ✚ Arena.
- ✚ Agua.

TEMPERATURA Y HUMEDAD:

La temperatura de ensayos del laboratorio deberá ser mantenida entre 20 °C y 27,5 °C, teniendo en cuenta que las herramientas a utilizar también debe encontrarse en dicho rango en el momento de ensayo. La temperatura del agua para la mezcla debe ser de 23 °C±2 °C.

La humedad relativa del laboratorio no debe ser inferior al 50%.

RELACIÓN CAL : ARENA:

La proporción cal : arena para la mezcla debe ser de 1:3.

AGUA PARA LA MEZCLA:

La cantidad de agua necesaria, debe ser la que produzca una fluidez del 100%, determinada de acuerdo al procedimiento de referencia descrito en la norma NTC 111 (*Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico*).

PREPARACIÓN Y SATURACIÓN DE LA CAL APAGADA:

Tamizar la cal, utilizando el Tamiz No. 8. Posteriormente, debe saturarse por 24 horas antes de realizar la mezcla.

PREPARACIÓN DE LA MEZCLA EN LABORATORIO:

1. Determinar la humedad de la arena.



PROTOCOLO
DISEÑO DE MORTERO DE CAL Y ARENA
LABORATORIO DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

ECI-PLME-042
Mayo – 2016
Hoja 2 de 3

2. Verter el agua de amasado en la mezcladora.
3. Agregar la cal al agua y mezclar por 30 segundos a velocidad baja.
4. Agregar lentamente la arena, en un intervalo de tiempo de 30 segundos, mientras se mezcla a velocidad baja.
5. Detener la mezcladora y cambiar la velocidad a rápida, y mezclar por 30 segundos.
6. Detener la mezcladora y dejar reposar el mortero por 90 segundos. Durante los primeros 15 segundos, con ayuda del raspador, arrastrar hacia el fondo el mortero adherido a la pared del recipiente, durante el resto del intervalo de tiempo, tapar el recipiente.
7. Mezclar a velocidad rápida por 60 segundos.
8. Dado el caso de que el mortero requiera un período de mezclado, debe arrastrarse rápidamente el material adherido a la pared del recipiente antes de iniciar el mezclado adicional..

PREPARACIÓN DE LA MEZCLA EN CAMPO:

1. Determinar la humedad de la arena.
2. Colocar la cal y la arena en el recipiente para mezcla.
3. Mezclar la arena y la cal a mano.
4. Continuar mezclando los materiales e ir añadiendo el agua poco a poco. Mezclar por 10 minutos hasta obtener el mortero con la manejabilidad adecuada.

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS:

Elaborar probetas para ensayos con los morteros en campo y en laboratorio, con el objetivo de poder comparar las propiedades de las dos mezclas. Las probetas deben desmoldarse a las 72 horas de su fabricación.

BIBLIOGRAFÍA

- INCONTEC. (1995). *NTC 112 MEZCLA MECÁNICA DE PASTAS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y MORTEROS DE CONSISTENCIA PLÁSTICA. Norma Técnica Colombiana*. Bogotá: ICONTEC.
- Lanas, J., Pérez Bernal, J. L., Bello, M. A., & Alvarez, J. I. (2006). Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 951–960. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.004>

288 Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas



PROTOCOLO
DISEÑO DE MORTERO DE CAL Y ARENA
LABORATORIO DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

ECI-PLME-042
Mayo – 2016
Hoja 3 de 3

The Scottish Lime Centre. (2003). Preparation and Use of Lime Mortars. Retrieved from http://issuu.com/hspubs/docs/tan_01__preparation_and_use_of_lime_mortars

Tribulová, T., & Kotlík, P. (2012). PREPARATION OF MORTARS FOR RESTORATION, 269–279.

Bibliografía

1. (RAE), R. A. E. (2017). Real Academia Española (RAE). Recuperado el 2 de marzo de 2017, a partir de <http://dle.rae.es/?id=6eoHd3H>
2. Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2011). Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>
3. American Society for Testing Materials. ASTM E 519-02: Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry addemblages, ASTM International § (2002).
4. ANCADE. (s/f-a). Aplicaciones por producto. Recuperado el 11 de abril de 2017, a partir <http://www.ancade.com/files/documentacion/documentos/aplicacionesancade.pdf> de
5. ANCADE. (s/f-b). Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE). Recuperado el 7 de abril de 2017, a partir de http://www.ancade.com/La-Cal_es_23.html
6. ANFACAL. (s/f). La cal en la Industria de la Construcción. Recuperado el 11 de abril de 2017, a partir de http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/La_cal_en_la_construccion.pdf
7. Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2006). Carbonation process in lime pastes with different water/binder ratio. *Materiales De Construccion*, 56(February), 5–18.
8. Arizzi, A., Cultrone, G., & Sebastián, E. (2009). Estudio de las fases minerales de neoformación en morteros de cal aérea tras la adición de metacaolín y sulfoaluminato cálcico. *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (11), 29–30.

Recuperado a partir de http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla11/Macla11_29.pdf

9. Arizzi, A., Martínez Martínez, J., Cultrone, G., & Benavente, D. (2011). Mechanical Evolution of Lime Mortars during the Carbonation Process. *Key Engineering Materials*, 465(January 2011), 483–486. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.465.483>
10. Ball, R. J., El-Turki, A., & Allen, G. C. (2011). Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. *Materials Science and Engineering A*, 528(7–8), 3193–3199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.070>
11. Bellini, A., Incerti, A., Bovo, M., & Mazzotti, C. (2017). Effectiveness of FRCC Reinforcement Applied to Masonry Walls Subject to Axial Force and Out-Of-Plane Loads Evaluated by Experimental and Numerical Studies. *International Journal of Architectural Heritage*, 3058(June), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323246>
12. Binici, H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1191–1197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002>
13. Böke, H., Akkurt, S., & Elif, U. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, 36, 1115–1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>
14. Borri, A., Castori, G., & Corradi, M. (2011). Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords. *Construction and Building Materials*, 25(2), 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.014>
15. Cañón, J. D. (2012). *Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5928/1/6706505.2012.pdf>
16. Carozzi, F. G., Milani, G., & Poggi, C. (2014). Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) systems for strengthening

- of masonry structures. *Composite Structures*, 107, 711–725. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.026>
17. Castro, Al., Ferreira, Ri., Lopes, A., Cascudo, O., & Carasek, H. (2004). Relationship between Results of Accelerated and Natural Carbonation in Various Concretes. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, (November), 988–997. <https://doi.org/10.1617/2912143756.109>
18. Cazalla, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Universidad de Granada. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/10481/28626>
19. Costigan, A., Pavía, S., & Kinnane, O. (2015). An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. *Journal of Building Engineering*, 4, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.10.001>
20. De La Rosa Ortiz, G. A. (2016). *Comportamiento mecánico de hormigones a base de mortero de cal y barras de fibra de vidrio para su implementación en rehabilitaciones del patrimonio edificado*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/2117/87920>
21. Domínguez, J. G. (2000). *Materiales de construcción*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM).
22. Drysdale, R., Hamid, A., & Baker, L. (1994). Ancient masonry. En *Masonry Structures: Behavior and Design* (1a ed., pp. 1–33). New Jersey: Prentice Hall Inc.
23. El-Turki, A., Ball, R., & Geoffrey, A. (2009). The effect of carbonation on the mechanical and microstructural properties of lime and cement mortars. En *11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009)* (p. 8). Bath: University of Bath. Recuperado a partir de http://opus.bath.ac.uk/21017/1/2009_NOCMAT_El_Turki_et_al_Paper_39.pdf
24. Forster, A. (2012). Masonry Repair Options and Their Philosophical Ramifications. En J. Weber, K. Bayer, & F. Pintér (Eds.), *Historic Mortars* (Vol. 7, pp. 197–206).

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0>

25. Gallegos, H., & Casabone, C. (2006). Historia de la albañilería. En Pontificia Universidad Católica del Perú (Ed.), *Albañilería estructural* (3a ed., pp. 47–74). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú - Fondo Editorial.
26. Gárate, I. (1994). *Artes de la cal* (1a ed.). Madrid: Ediciones de la Universidad de Alcalá de Henares.
27. Gleize, P. J. P., Motta, E. V., Silva, D. A., & Roman, H. R. (2009). Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 342–346. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.013>
28. González, M. (2000). *Recuperación de morteros romanos de cal y Chamota en aplicaciones actuales*. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado a partir de <http://oa.upm.es/149/>
29. Hanley, R., & Pavía, S. (2008). A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength. *Materials and Structures*, 41(2), 373–381. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9250-0>
30. Ho, D. W. S., & Lewis, R. K. (1987). Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*, 17(3), 489–504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
31. ICOMOS. (1964). Carta Internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia 1964). Recuperado a partir de http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf
32. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Norma Técnica Colombiana NTC 111: Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico (1997).
33. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Norma Técnica Colombiana NTC 220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm ó 50,8mm de lado (1997).
34. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Norma Técnica Colombiana NTC 3495:

- Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (2003).
35. Instituto Colombiano de Normas Tecnicas. Norma Técnica Colombiana NTC 3546: Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada (2003).
 36. Instituto Colombiano de Normas Tecnicas. Norma Técnica Colombiana NTC 4017: Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla (2005). Bogotá.
 37. Iucolano, F., Liguori, B., & Colella, C. (2013). Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration. *Construction and Building Materials*, 38, 785–789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.050>
 38. Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867–1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
 39. Lanas, J., Pérez Bernal, J. L., Bello, M. A., & Alvarez, J. I. (2006). Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 951–960. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.004>
 40. Linares, D., & Sánchez, M. (2003). Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada, 26(1), 34–44.
 41. Lourenço, P. B. (2013). Conservation of cultural heritage buildings : methodology and application to case studies. ALCONPAT International. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/1822/26616>
 42. Lumantarna, R. (2012). *Material characterisation of New Zealand's clay brick unreinforced masonry buildings*. University of Auckland. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/2292/18879>
 43. Luque, A., Cultrone, G., & Sebastián, E. (2010). The use of lime mortars in restoration work on architectural heritage. En M. Bosternaru, R. Přikryl, & Á. Török (Eds.),

- Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* (pp. 197–207). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_11
44. Maldonado, N., Martín, P., & Maldonado, I. (2011). Seismic Mitigation of a Historic Masonry Building. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5(1), 61–70. <https://doi.org/10.2174/1874836801105010061>
45. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577–1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>
46. Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2008). Lime mortars with brick dust and grounded particles for ancient masonry: development and evaluation. En *HMC08-Historical Mortars Conference* (p. CD). LNEC.
47. Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste : A review. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, 73, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>
48. Meli, R. (1998). *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos* (1a ed.). Ciudad de México: Fundación ICA. A.C.
49. Mercado, E. (2007). Patrimonio edificado de propiedad privada: relación compleja y contradictoria entre lo público y lo privado en el Centro Histórico de Morelia. *Intervención (México DF)*, (4), 27–34. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-249X2011000200006&script=sci_arttext
50. Ministerio de Cultura. (2010). Legislación y normas generales para la gestión, protección salvaguardia del patrimonio cultural en Colombia: Ley 1185 y su reglamentación. Recuperado a partir de <http://nuevamuseologia.net/wp-content/uploads/2014/12/Ley11854.pdf>
51. Ministerio de Cultura y Patrimonio. (2005). *Manual para Inventarios de Bienes Culturales Inmuebles*. Bogotá D.C. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

52. Molano, M., & Torres, N. (2017). *Prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil* (1a ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
53. Molina, L. F., & Hinojosa, R. (2011). De la mampostería colonial al ladrillo a la vista. *Revista Nodo*, 5(10), 91–112.
54. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., & Anagnostopoulou, S. (2005). Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017>
55. Navrátilová, E., & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
56. Nežerka, V., Antoš, J., Litoš, J., Tesárek, P., & Zeman, J. (2016). An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading. *Construction and Building Materials*, 114, 913–924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.013>
57. Nežerka, V., Slížková, Z., Tesárek, P., Plachý, T., Frankeová, D., & Petrářnová, V. (2014). Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. *Cement and Concrete Research*, 64, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.006>
58. Osorno Henao, H. (2012). *Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6834/>
59. Pavlík, Z., Benešová, H., Matiašovský, P., & Pavlíková, M. (2012). Study on Carbonation Process of Several Types of Advanced Lime-Based Plasters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 70(2), 1005–1009. Recuperado a partir de <http://waset.org/journals/waset/v70/v70-187.pdf>

60. Peña, F., & Lourenço, P. B. (2012). Criterios Para el Refuerzo Antisísmico de Estructuras Históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 87(87), 47–66. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2012000200003
61. Peña, F., Rivera, D., & Arce, C. (2010). La conservación del patrimonio arquitectónico mediante una visión multidisciplinaria: el papel de la ingeniería. En *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural* (pp. 1–12). León, Guanajuato: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Recuperado a partir de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_11/ar_06.pdf
62. Peñaranda, L. (2011). *Manual para la conservación del patrimonio arquitectónico habitacional de Sucre*. Sucre. Recuperado a partir de http://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/Publicaciones_coeditadas_por_AECID/Manual_de_Intervencixn_PRAHS.pdf
63. Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>
64. Salamanca, R. (2000). Cementos Adicionados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 77–83.
65. Sepulcre, A. (2005). *Influencia de las Adiciones Puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés Historico-Artístico*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Recuperado a partir de http://oa.upm.es/264/1/Alberto_Sepulcre.pdf
66. Siddique, R. (2008). Metakaolin. En *Waste Materials and By-Products in Concrete* (pp. 41–92). Punjab: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4_2
67. Taly, N. (2010). Introduction. En *Design of Reinforced Masonry Structures* (2a ed., p. 1.1-1.15). McGraw-Hill Education.
68. The European Lime Association. (2016). *2015-2016 Activity Report*. Recuperado a

partir de <http://www.eula.eu/file/581/download?token=H1P7f8uh>

69. Torres, N. (2014). *Estudio en estado fresco y endurecido de concretos adicionados con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC)*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/46087/1/291521-2014.pdf>
70. Torres, N., Quiroga, P., Espitia, A., & Guzmán, A. (2016). *Caracterización de ladrillo patrimonial sentado en mortero de cal y arena*. Bogotá.
71. Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M. R., & Modena, C. (2006). Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars. *Composites Science and Technology*, 66(2), 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.042>
72. Usedo, R. (2016). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*. Universitat Politècnica de València. Recuperado a partir de <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/60200>
73. Van Balen, K., & Van Gemert, D. (1994). Modelling lime mortar carbonation. *Materials and Structures*, 27(7), 393–398. <https://doi.org/10.1007/BF02473442>
74. Vejmelková, E., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., & Černý, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 31, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084>
75. Velosa, A. L., Rocha, F., & Veiga, R. (2009). Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 6(1), 121–126.