

**MUROS DE MAMPOSTERÍA COLONIAL REVESTIDOS CON MORTERO A
BASE DE CAL REFORZADO CON FIBRAS COMO UNA ALTERNATIVA DE
RESTAURACIÓN Y REFORZAMIENTO DE EDIFICACIONES ANTIGUAS EN
LA CIUDAD DE CARTAGENA.**



ALVARO JAVIER YEPES TAPIA

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

2020

**MUROS DE MAMPOSTERÍA COLONIAL REVESTIDOS CON MORTERO A
BASE DE CAL REFORZADO CON FIBRAS COMO UNA ALTERNATIVA DE
RESTAURACIÓN Y REFORZAMIENTO DE EDIFICACIONES ANTIGUAS EN
LA CIUDAD DE CARTAGENA.**

Investigador:

ALVARO JAVIER YEPES TAPIA

Informe final, trabajo de grado.

Grupo de investigación:

ESCONPAT

Línea de investigación:

CONSERVACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LOS MONUMENTOS

Investigador director:

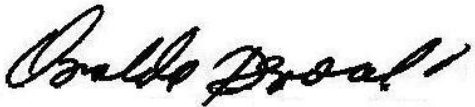
ARNOLDO BERROCAL OLAVE, PhD.

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

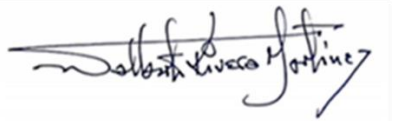
2020

Muros de mampostería colonial revestidos con mortero a base de cal reforzado con fibras como una alternativa de restauración y reforzamiento de edificaciones antiguas en la ciudad de Cartagena

NOTA DE ACEPTACION



**Firma del director
ARNOLDO BERROCAL OLAVE**



**Firma del jurado
WALBERTO RIVERA MARTINEZ**



**Firma del jurado
RAMÓN TORRES ORTEGA**

AGRADECIMIENTOS

Durante toda mi etapa de pregrado siempre estuve a la expectativa de este momento, honestamente nunca pensé que llegara tan rápido, pero si miro hacia atrás puedo sentirme satisfecho por todo el aprendizaje que me quedó al pasar por la universidad, no solo académico, en lo personal y emocional también aprendí demasiado, por toda esa experiencia agradable hoy solo puedo dar gracias.

A mi familia, en especial a mi madre Enith Tapia, mi hermana Liseth Yepes y mi tía Alcira Tapia, casi mi segunda madre, mil gracias por todo ese apoyo incondicional, sin ustedes esto no hubiese sido posible. Gran parte de lo que hoy en día soy fue aprendido e inculcado por mi familia en general. Mi papá, mis primos, tíos, todos han sido importantes en mi vida.

A mis amigos, esos que me han acompañado desde la infancia y que siempre estamos pendientes de nuestras vidas, gracias por hacer parte esta historia y acompañarme en el camino. A todas esas buenas amistades que hice en la universidad, una gran parte de esta carrera fue culminada con su ayuda, esas grandes personas que conocí y con quienes compartí momentos únicos, viajes inolvidables, esos que me ayudaron a crecer personalmente, toda mi gratitud hacia ustedes.

Entre ellos es importante mencionar a quienes fueron imprescindibles para desarrollar esta investigación, Aldair Coavas, mi mano derecha durante la realización de ensayos de laboratorio y July Devoz, puedo considerarte como compañera de tesis, aunque las nuestras hayan sido investigaciones diferentes. Aparte, el resto de mi grupo de estudio y amigos más cercanos, Moisés Agamez, Ingrid Ramirez, Nicole Zakzuk, Jairo Ortiz, Daniel Paternina, Laura Terán. Con ustedes pasamos las verdes y maduras, también al grupo de amigos popularmente conocido como “la cúpula”, aún me da risa ese nombre, pero está lleno de personajes excepcionales. A ustedes, gracias por todo.

A mi director de tesis y gran profesor de estructuras que tuve, Arnoldo Berrocal. A nuestro Coordinador de investigación y quien nos ayudó demasiado durante la fase experimental, Andrés Camargo, a ustedes muchas gracias por sus asesorías y colaboración.

Es posible que muchos se me hayan escapado, la lista es bastante larga, lo importante es el sentimiento de gratitud que puedo reflejar hacia todos aquellos que me ayudaron durante mi etapa de pregrado, esta no fue fácil, pero la disfruté plenamente. Es el final de esta etapa y hoy sólo quedan buenos recuerdos, anécdotas inolvidables y amistades para toda la vida.

Sin más que decir, mil gracias a todos.



Contenido

RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN	5
1. MARCO REFERENCIAL	7
1.1 ANTECEDENTES	7
1.2 ESTADO DEL ARTE	14
1.3 MARCO TEÓRICO	22
1.3.1 La Ingeniería De Cartagena De Indias	22
1.3.2 Mampostería.....	26
1.3.3 Muros de mampostería.....	27
1.3.4 Introducción a las fibras	28
1.3.5 Tipos de fibras.....	28
1.3.6 Rehabilitación / procedimientos de refuerzo.....	31
1.3.7 Consideraciones para la restauración de patrimonios históricos: Principios teóricos.....	32
2.3.8 Esfuerzo normal y deformación unitaria.....	32
1.3.9 Ensayos Destructivos	34
1.3.10 Ensayos no destructivos	35
2. OBJETIVOS	37
2.1. OBJETIVO GENERAL	37
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
3. ALCANCE.....	38
4. METODOLOGÍA	41
6.1 Revisión bibliográfica	42
6.2 Adquisición de materiales.....	42
6.4 Ensayos realizados a los materiales.....	43
6.4 Construcción de muretes de mampostería colonial	55
6.5 Ensayos no destructivos de ultrasonido sobre los muretes.....	56
6.6 Proceso de revestimiento de los muretes.....	57
6.7 Ensayo de compresión sobre los muretes	66
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68



6. CONCLUSIONES	90
7. RECOMENDACIONES	92
ANEXOS	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factor de corrección por esbeltez para $f'm$	35
Tabla 2. Resultados de ensayo de contenido de humedad de los agregados.....	68
Tabla 3. Resultados de resistencia al desgaste para los agregados utilizados.....	70
Tabla 4. Resultado ensayo de gravedad específica y absorción.....	71
Tabla 5. Resistencia a la compresión de cubos de mortero con adición de cemento para diferentes dosificaciones de fibra.....	73
Tabla 6. Ensayo de compresión sobre mortero a base de cal hidratada con adición de diferentes porcentajes de fibra	75
Tabla 7. Resultados de ensayo a la compresión del mortero a base de diferentes tipos de Cal (promedio).....	76
Tabla 8. Velocidad de pulso para los muretes sin reforzamiento	79
Tabla 9. Resultados ensayo de compresión simple sobre muretes no reforzados.....	83
Tabla 10. Esfuerzo de falla en muretes reforzados con mortero de restauración	86
Tabla 11. Módulos de elasticidad de los muretes sin reforzar	89



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de dos probetas rotas a compresión en prensa. Aligerado con métodos convencionales (izquierda) y reforzado con fibras de polipropileno más granulado de corcho (Derecha).....	17
Figura 2. Diferentes formas de las fibras	29
Figura 3. Formas adicionales de fibras	30
Figura 4. Comportamiento del concreto reforzado con fibras metálicas	30
Figura 5. Curva de carga (P) – desplazamiento (σ) para concreto reforzado (a) bajo contenido de fibras, (b) alto contenido de fibras.....	31
Figura 6. Equipo de ultrasonido.....	36
Figura 7. Opciones de instalación de transductores	36
Figura 8. Universidad de Cartagena, sede Piedra Bolívar	38
Figura 9. Vivienda donde se construirán los muretes	39
Figura 10. Muestra de ladrillo.....	44
Figura 11. Muestra de caliza	44
Figura 12. Muestra de pómez.....	44
Figura 13. Peso seco de muestra	45
Figura 14. Peso de recipiente	45
Figura 15. Secado de muestras en el horno.....	45
Figura 16. Granulometrías normalizadas	45
Figura 17. Muestra de pómez al salir de la máquina.....	46
Figura 18. Muestra de pómez pasada por tamiz #12.....	46
Figura 19. Muestra pómez, ensayo resistencia al desgaste	46
Figura 20. Muestra caliza lavada, luego de pasar por la máquina de los ángeles.....	46
Figura 21. Muestra caliza, previa al ensayo de desgaste.....	47
Figura 22. Muestra caliza lavada luego del ensayo de desgaste.	47
Figura 23. Muestras de pómez y ladrillo sumergidas	47
Figura 24. Muestra caliza sumergida	47
Figura 25. Peso Saturado superficialmente seco de caliza.....	48
Figura 26. Peso saturado superficialmente seco de pómez.	48
Figura 27. Peso saturado superficialmente seco del ladrillo.....	48
Figura 28. Peso sumergido piedra pómez	49
Figura 29. Peso sumergido piedra caliza.....	49
Figura 30. Peso seco del ladrillo	49
Figura 31. Peso seco de la caliza.....	49
Figura 32. Ensayo de resistencia a la compresión del mortero a base de cal (cal:arena).....	50
Figura 33. Materiales usados para fabricar cubos de mortero (cal, cemento, arena).....	51
Figura 34. Mezcla de mortero sin agregarle agua	51
Figura 35. Peso en fibra correspondiente a un 0.06% del peso en Cal	51
Figura 36. Adición de fibra a la muestra de mortero	51
Figura 37. Cubos de mortero a base de cal sin reforzar	52



Figura 38. Ensayo de compresión simple sobre cubos de mortero	52
Figura 39. Cubo de mortero durante ensayo de compresión simple, adición de 0.13% de fibra.	52
Figura 40. Resistencia a la compresión del cubo de mortero.....	52
Figura 41. Cubo de mortero con adición de 0.24% de fibra durante prueba de compresión simple	53
Figura 42. Resistencia alcanzada por la muestra	53
Figura 43. Cubo de mortero con adición de 0.06% de fibra durante prueba de compresión simple	53
Figura 44. Resistencia alcanzada por la muestra	53
Figura 45. Ensayo de resistencia a la compresión del mortero a base de cal apagada sin reforzar	54
Figura 46. Proceso de construcción de muretes de mampostería colonial.....	56
Figura 47. Realización de ensayos de ultrasonido sobre los muretes	57
Figura 48. Preparación del mortero de revestimiento y de los muretes a reforzar.....	58
Figura 49. Revestimiento de los muretes con mortero a base de Cal reforzado con fibras de polipropileno	59
Figura 50. Desprendimiento del mortero de revestimiento de los muretes.....	60
Figura 51. Adquisición de la Cal apagada dentro de la obra de restauración en el centro histórico de Cartagena.....	61
Figura 52. Proceso de remoción del pañete exterior de los muretes.....	62
Figura 53. Revestimiento de muretes con mortero a base de Cal apagada reforzado con fibras al 0.06%.....	63
Figura 54. Agrietamiento y desprendimiento del mortero de revestimiento a base de cal apagada.....	64
Figura 55. Preparación del mortero de restauración Planitop HDM Restauro	65
Figura 56. Revestimiento de muretes con Planitop HDM Restauro	66
Figura 57. Ensayos de compresión simple sobre muretes sin reforzar	67
Figura 59. Ensayos destructivos de compresión simple sobre muretes sin refuerzo	82



RESUMEN

En la presente investigación se estudió el comportamiento mecánico de muretes de mampostería colonial Tipo I fabricados con materiales actuales, en específico la resistencia a la compresión, la deformabilidad y el módulo de elasticidad de estos. La base del estudio fue analizar que sucedía cuando a dichos muretes se les aplicaba un mortero de revestimiento hecho a base de Cal reforzado con fibras, verificar si sus características mecánicas aumentaban y finalmente si esta técnica de reforzamiento podría utilizarse para efectos de restauración sobre las estructuras coloniales que actualmente se encuentran en el centro histórico de la ciudad de Cartagena. Este análisis se hizo por medio de ensayos de compresión simple sobre muretes con y sin mortero de refuerzo.

Luego de haber analizado el comportamiento de los morteros a base de Cal cuando se le adicionaba fibras de polipropileno se pudo observar que la resistencia alcanzada por el mortero era inversamente proporcional al porcentaje de fibra adicionado, a menor cantidad de fibras mayor resistencia alcanza el mortero. Se reafirmó que la principal falla de los muretes se da por el mortero de pega de los agregados por lo que se recomienda estudiar más a fondo cual es la forma adecuada de hacer morteros de restauración con cal, en especial utilizando cal viva. Esta ha sido la necesidad más evidente dentro del presente estudio.

Finalmente, no se recomienda usar mortero reforzado con fibras para restaurar estructuras antiguas puesto que no es una técnica factible. Al utilizarla, la resistencia promedio aumentó un 11% en los muretes, pasó de 0,43 a 0,49 MPa; En estudios anteriores esta resistencia variaba entre 0,3 y 0,5 MPa (Acuña A. 2018), con esto se concluye que la técnica usada en este estudio no funcionó. La deformabilidad tampoco sufrió un gran cambio, aunque los muretes se volvieron un poco más rígidos cuando se revistieron, este aumento no fue sustancial. El esfuerzo necesario para alcanzar un 60% en la deformación unitaria pasó de 0.21 a 0.4 MPa. Estos valores se mantienen en un rango muy bajo, por ello se concluye que esta técnica en general no aumenta las propiedades mecánicas de los muretes.

Los resultados anteriores se lograron cuando se utilizó un mortero especial de restauración, cuando se usó mortero de Cal hidratada y luego de Cal apagada para el revestimiento, no se obtuvo un buen resultado; el primero no desarrolló adherencia con el murete y el segundo no alcanzó una buena resistencia aparte de que sufrió el efecto de retracción plástica una vez que se aplicó sobre el murete. Por tanto, se reafirma que esta técnica no proporciona buenos resultados.



INTRODUCCIÓN

Cartagena de Indias, siendo la capital del departamento de Bolívar es una de las ciudades más importantes del país, su valor patrimonial por ser el conjunto más extenso, completo y mejor conservado en América de la arquitectura de defensa española, su infraestructura antigua perteneciente a la época colonial y que recoge varios estilos de técnicas constructivas (medieval, renacentista y barroca), los fuertes militares, el cordón amurallado y los diferentes claustros del centro histórico son bienes patrimoniales que deben preservarse. La importancia de estas obras coloniales está ratificada con el reconocimiento de “Patrimonio histórico de la humanidad” que recibió la Ciudad por parte de la Unesco en el año 1984. (Yepes Madrid, G. 2018)

La construcción de los fuertes y murallas de la ciudad se desarrolló bajo la dirección de los mejores ingenieros militares y constructores de la época bajo el mando de la corona española, estas construcciones contaban con mano de obra de la mejor calidad y al mismo tiempo los materiales de construcción utilizados sobre estos fuertes eran cuidadosamente seleccionados. En su mayoría las construcciones se constituían por 4 materiales característicos, estos son la tableta militar o ladrillo militar, la piedra caliza o piedra coralina, piedra pómez y el aglomerante a base de cal conocido como Argamasa (mezcla de cal y arena). Estos 4 elementos mezclados forman el concreto ciclópeo que se encuentra en los muros de mampostería colonial tipo I de la ciudad de Cartagena. (Cabrera Cruz, A. 2017)

En cuanto a las edificaciones de uso residencial, se puede decir que se construyeron con materiales similares a los de los fuertes de la ciudad, pero con la diferencia que en las casas coloniales estos materiales no contaban con la alta calidad y mano de obra calificada que tenían las murallas, la razón principal era porque la corona española destinaba muchos recursos en la construcción de dichas edificaciones militares, pero la construcción de una vivienda quedaba a merced de los recursos económicos que tuviera una familia, sin mencionar que los mejores maestros de obras ya estaban ocupados en la construcción de estos mismos fuertes. Por lo tanto, la mano de obra menos calificada era la que se encargaba de erigir las edificaciones residenciales de la ciudad de Cartagena. Mismas edificaciones que hoy en día cuentan con diferentes usos, como establecimientos comerciales y gubernamentales. (Cabrera A. & Martínez R. 1990)

Debido a diferentes factores, como por ejemplo el paso del tiempo, el aumento en las cargas actuantes sobre las edificaciones, el deterioro de los materiales y las reacciones químicas que se presentan en la matriz del concreto ciclópeo de los muros de mampostería por agentes como los cloruros y sulfatos, muchas de las construcciones antiguas de Cartagena requieren de una restauración y obras de mantenimiento para poder conservar sus buenas condiciones, consecuentemente, mantener el título de patrimonio histórico de la humanidad. (España J., Puello E. & Almanza E., 2009)



Se encontraron investigaciones relacionadas con la restauración de éstos monumentos, donde se evidencia que el uso de materiales actuales como el cemento Portland no genera una compatibilidad con el material antiguo, pues sus propiedades y características mecánicas son totalmente diferentes a las propiedades de los materiales utilizados en la antigüedad (Durán Ruiz L., 2016). Por esta razón, es importante que los materiales utilizados en la restauración de construcciones antiguas, se asemejen o en lo posible, sean iguales a los utilizados originalmente en su construcción, es decir, para las obras coloniales se debe usar aglomerante a base de Cal y no a base de cemento.

Otro detalle a tener en cuenta es que, la calidad de la cal que comercialmente se encuentra en la actualidad es mucho menor que la utilizada para construir las obras coloniales de la ciudad de Cartagena (Cabrera Cruz A., 2017). En este sentido, para efectos de restauración, es de gran importancia utilizar aglomerantes que sean compatibles con las construcciones antiguas pero que además tengan un buen desempeño en sus características como la resistencia mecánica. En este campo de investigaciones se desarrollaron diferentes estudios donde analizan el uso de adiciones químicas, así como fibras de refuerzo, para mejorar las características mecánicas de los morteros a base de Cal.

En cuanto al uso de fibras en el mortero a base de Cal, se encontraron investigaciones donde adicionan fibras de vidrio, polipropileno, basalto y hasta granulado de corcho a este. Todos los estudios llegan a la conclusión que el uso de este material para reforzar los morteros a base de Cal, mejora en gran medida la ductilidad del material y en algunos casos su resistencia mecánica.

Sabiendo esto, en este estudio se utilizó mortero a base de Cal reforzado con fibras para revestir muretes de mampostería colonial Tipo I, se evaluó por medio de ensayos destructivos si aumentaba la resistencia mecánica y deformabilidad de los muretes, así mismo se determinó en cierto grado la factibilidad de usar estos materiales en las obras de restauración y reforzamiento de estructuras antiguas que hacen parte del patrimonio histórico de la ciudad de Cartagena, esta investigación está cobijada por el grupo de investigación Esconpat, ya que entre sus líneas de investigación se encuentra la de “Conservación y consolidación de los monumentos”.



1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

Debido a la importancia que tienen los monumentos históricos y las edificaciones coloniales para la ciudad de Cartagena, y específicamente el interés que existe por conservar el título de patrimonio histórico de la humanidad, son muchas las investigaciones que se han llevado a cabo relacionadas con la conservación y restauración de este patrimonio, específicamente en el aspecto de materiales de construcción y restauración de estos elementos han desarrollado muchos estudios. En cuanto al aspecto estructural de estos elementos patrimoniales son pocas las investigaciones que se han desarrollado en la ciudad. Sin embargo, a continuación, se presenta una descripción cronológica de los diferentes estudios realizados sobre los elementos patrimoniales de la ciudad de Cartagena de Indias, donde se tiene en cuenta el aspecto estructural, así como los materiales de construcción de estos mismos.

Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipología colonial (España Moratto & Tapia de Oro, 2008)

En este trabajo se buscó determinar los parámetros básicos para normalizar la mampostería colonial usada en las construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena. En él se estudiaron las propiedades estructurales de cuatro tipos de muros que se encuentran en las edificaciones residenciales coloniales, el análisis se realizó para determinar parámetros estructurales que permitieran la capacidad de carga de estos mismos. La razón que impulsó este estudio fue la falta de normatividad aplicable para este tipo de estructuras coloniales en Colombia, construidas con materiales como ladrillo militar, piedra caliza y argamasa como aglomerante a base de cal. La metodología de investigación que se utilizó fue analizando estudios ya realizados sobre la argamasa, efectuados anteriormente por profesionales de la Universidad de Cartagena, con base en esto y usando diferentes proporciones Cal-arena se calcularon las resistencias de los diferentes tipos de muros y la carga que estos recibían en teoría. Por medio de esta investigación se pudo establecer una expresión matemática para calcular la carga axial que resisten los diferentes tipos de muros que conforman las edificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena. El detalle que limita esta investigación es la falta de verificación de resultados por medio de experimentación, si bien todas las expresiones se basan en resistencias halladas anteriormente por medio de ensayos, en la investigación no se verifican los resultados de resistencias para las diferentes dosificaciones planteadas.

Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias. (España Moratto J., Puello Mendoza E. & Almanza Vásquez E., 2009)

En esta investigación se determina de manera empírica la resistencia de diferentes mezclas de piedra coralina, piedra de coral, ladrillos tipo tableta militar y argamasa (mezcla de cal y arena), que actúa como material aglomerante, para normalizar la mampostería de tipología



colonial, usada en las construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena de Indias. Se determinaron las propiedades estructurales de los cuatro tipos de muros que se encuentran en las edificaciones residenciales coloniales, obteniendo parámetros estructurales que servirán para evaluar sus capacidades de carga y el factor de corrección α que afecta la resistencia teórica calculada en los muros, respecto a la resistencia estructural. Se establece teóricamente la mejor composición de las proporciones de los materiales de las mezclas, desde el punto de vista de la resistencia de las estructuras coloniales. Entre las conclusiones se indica que cuando la argamasa se prepara con una proporción 1:1, la resistencia del ciclópeo es ligeramente mayor que cuando se prepara en proporción 1:2 y ésta, ligeramente mayor a la preparada en proporción 1:3. También se concluyó que a menor cantidad de argamasa que mezcla de agregados en el ciclópeo, la resistencia a la compresión de éste es mayor. De igual manera se puede observar, que las mayores resistencias en los ciclópeos se obtienen con las mezclas de agregado grueso que presentan mayores resistencias proporcionales, y estas resistencias se presentan en las combinaciones que poseen mayor porcentaje de ladrillo o tableta militar, independientemente de los porcentajes de piedra coral y piedra coralina.

Cabe resaltar una limitación presente, y es que esta investigación se basó en información teórica y no se realizaron pruebas experimentales para ratificar que los resultados encontrados en la teoría coincidían con la práctica. Las resistencias que los autores calculan para la mampostería es con base a la suma de las resistencias parciales de cada uno de sus componentes, proporcional al porcentaje de participación en la mezcla, pero en ningún momento se tiene en cuenta el desempeño de todos los materiales trabajando como un conjunto ni tampoco el efecto que puede producirse en la mampostería el uso de bajas cantidades de argamasa.

Resistencia estructural de la mampostería de tipología colonial, cascoteo, en las estructuras de la ciudad de Cartagena de Indias (Gamarra Atencia J. & Martínez Domínguez I, 2011)

En esta investigación se buscó determinar la resistencia estructural de la mampostería colonial usada en las edificaciones de la ciudad de Cartagena de Indias mediante una serie de ensayos destructivos a los materiales que conformaban dicha mampostería (argamasa, piedra coralina, piedra caliza y ladrillo) y a muretes a pequeña escala construidos con materiales rescatados de una casa colonial que estaba siendo restaurada. En el estudio se investigaron diferentes alternativas de dosificación de agregados mediante un análisis teórico donde se variaban las proporciones de piedra coralina, ladrillo y piedra caliza, donde finalmente se encontró que la mezcla óptima estaba compuesta por las siguientes proporciones 33%, 33% y 33% para la piedra coralina, ladrillo y piedra caliza respectivamente. También se diseñaron muretes de mampostería con mezclas dosificadas en diferentes proporciones (variando la proporción de argamasa y mezcla de agregados en cada caso), todas las mezclas tenían una adición de cemento que, según los autores, cumplía el objetivo de acelerar el proceso de fraguado de la cal. Una vez realizadas las mezclas, se construyeron muros a pequeña escala con dimensiones de 25x25x25 cm y fueron sometidos a ensayos destructivos en una máquina



de compresión universal. Así como los muretes, los materiales de construcción también fueron sometidos a ensayos de laboratorio, tanto destructivos como de caracterización de agregados. En los resultados se obtuvieron resistencias a la compresión en los muretes de mampostería colonial que van desde 7.61 kg/cm² hasta 56.11 kg/cm². Los autores concluyeron que cuando hay pequeñas cantidades de argamasa, las resistencias de los muretes son menores debido a que la argamasa no logra cubrir o llenar los vacíos entre los agregados. Con la mezcla de agregados escogida, las mayores resistencias alcanzadas estuvieron en un rango de 54-57 kg/cm², valores que podrían ser utilizados para diseño de mezclas en procesos de restauración. Una de las observaciones importantes era que a mayor cantidad de argamasa las resistencias a la compresión aumentaban, esto debido a la acción del cemento portland en la mezcla. Finalmente, los autores recomiendan disminuir el uso de cemento en las mezclas de mampostería puesto que este material es un limitante en cuanto a las dosificaciones y es sabido que actualmente no se permite su uso en las restauraciones de la ciudad de Cartagena, además de la anterior, se observó que los muretes construidos tenían una proporción cúbica, todas sus dimensiones eran iguales, pero en la realidad los muros tiene un espesor que representa su dimensión más pequeña, además que la relación que debe existir entre el largo y el ancho del muro no se presenta en los muretes construidos.

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales más utilizados y disponibles en la región para la restauración de las fortificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena. (Meza Flórez & Cohen Rhenals, 2011)

Esta investigación tuvo como finalidad determinar las propiedades físicas y mecánicas de los principales materiales disponibles para restaurar el cordón amurallado de la ciudad de Cartagena, tomando como referencia las principales fuentes que los suministran en el departamento de Bolívar. Para cumplir este objetivo, se recolectó toda la información existente sobre el tema, se contactó con arquitectos que han intervenido estas fortificaciones, se visitaron entidades encargadas de conservar los monumentos de la ciudad y se realizaron ensayos a los materiales hallados (caliza, ladrillo y argamasa) en las distintas fuentes (Turbaco y Bayunca). Las propiedades físicas y mecánicas que se establecieron como fundamentales en dichos materiales fueron: la resistencia a la compresión, desgaste, densidad y porosidad.

Las comparaciones realizadas en los ensayos mostraron que las piedras calizas que cuentan con las mejores propiedades físicas y mecánicas son las extraídas de la Cantera Coloncito y La Constancia, mientras que las piedras de la cantera Guadalupe mostraron las características menos apropiadas para las restauraciones del Cordón amurallado (con un porcentaje mayor al 50% en el ensayo de desgaste y una resistencia de 37,04 Kg/cm²). El caso de los ladrillos, se observaron resistencias similares en las distintas fuentes, los ladrillos que presentaron mayor resistencia fueron los de la Ladrillera El Peaje. Las pruebas realizadas a la mezcla de argamasa dieron como resultado una resistencia más alta en los cubos de relación dos partes de arena por una de cal (3,34 Kg/cm²) frente a la relación dos partes de cal por una de arena (2,97 Kg/cm²); además de esto, se mostró que existe una relación directa entre la resistencia



y el número de días que tenía la muestra. Una de las limitantes es que en este estudio no se evalúa el comportamiento de los materiales como un conjunto, como se comportan los muros antiguos de concreto ciclópeo, sino que se analizan por separado cada uno de los materiales.

Propiedades mecánicas de la mampostería colonial de edificaciones en la ciudad de Cartagena de Indias. (Cuevas Mercado A. & Herrera Corrales C., 2013)

En esta investigación se determinaron las características mecánicas de la mampostería colonial tipo III (Tableta militar y argamasa) de edificaciones de uso residencial en la ciudad de Cartagena de Indias, se calcularon la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, el módulo de corte, la relación de Poisson, el peso por unidad de volumen, la masa por unidad de volumen, la resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla cocidos y la resistencia a la compresión de la argamasa. La realización de los ensayos se desarrolló con base en el material recuperado de una casa colonial del centro histórico de la ciudad que estuvo sometida a un proceso de remodelación, los ladrillos extraídos fueron modificados y moldeados para obtener muros a pequeña escala con características uniformes. De acuerdo a los resultados, se demostró que las ecuaciones propuestas por el Código Colombiano Sismo Resistente (NSR-10) no asemejan las propiedades mecánicas de la mampostería colonial (para este caso compuestas por tabletas de arcilla y mezclas aglutinantes de argamasa). Se encontró que la resistencia a la compresión de la mampostería colonial tipo III es de 36 Kg/cm² aproximadamente y que el módulo de elasticidad de esta misma tiene un valor de 18.350 Kg/cm². Entre las conclusiones este estudio planteó nuevas ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad y el módulo de corte en relación con la resistencia a la compresión de la mampostería colonial tipo III. Ecuaciones que dan nuevos lineamientos y que permiten realizar la caracterización de la mampostería de manera más exacta y real. Entre las limitaciones se puede mencionar que sólo se estudió un tipo de mampostería colonial, además que para estudiar la resistencia al corte no se utilizó una maquinaria especial, sino que se usó la correlación presente en la NSR-10 (que se evidenció no es aplicable en estos muros).

Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de Tierra Bomba para comprobar su uso en la construcción de las murallas de Cartagena de Indias y compararlo con el utilizado actualmente en su restauración, proveniente de la cantera “Coloncito” en Turbaco. (Fernández Torres G. & Palencia Cantillo S., 2014)

Esta investigación está relacionada con la construcción de los monumentos históricos de la ciudad de Cartagena y en especial los materiales que usaron para construir el cordón amurallado de la ciudad. El objetivo era confirmar y demostrar que el material utilizado para su construcción provenía de Tierra Bomba. Adicionalmente, se compararon las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas con el usado para su restauración, el objetivo era comprobar que este material es óptimo para restaurar este tipo de obras. El proceso de estudio se basó en información bibliográfica y en ensayos de laboratorio sobre los materiales de restauración, donde se mencionan: densidad,



desgaste, resistencia a la compresión y porosidad. Para el caso del material constitutivo de las murallas se usó información secundaria para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas. Entre los resultados se encontró que el material extraído de Tierra Bomba es 63,44% menos resistente que el de Coloncito y coincide solo con la zona 3 de las murallas (Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier), con una resistencia a la compresión de $110,52 \text{ kg/cm}^2$ y porcentaje de desgaste del 33.70%. La diferencia porcentual encontrada entre las densidades de los materiales es de 1,43% y para la porosidad total de 0,25%. Se observó que el material de Coloncito coincide con la zona 2 (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago). Los resultados confirman la utilización del material de Tierra Bomba en la construcción de las murallas de Cartagena y además se avala la utilización del material de Coloncito para obras de restauración en los monumentos coloniales de la ciudad. El estudio presenta ciertas limitaciones, por ejemplo, no se realizó ensayo de resistencia al desgaste por sulfatos a los agregados analizados (teniendo en cuenta que los materiales de las murallas se encuentran constantemente expuestos a estos agentes químicos), tampoco se determinó la resistencia al desgaste en los materiales propios de la muralla por cuestiones legales (no está permitido extraer o destruir de alguna forma los bienes patrimoniales de la ciudad) y por último, hay tramos de murallas que presentan materiales que no corresponden a los estudiados de tierra bomba y tampoco a los extraídos de la cantera “Coloncito”, por lo que se recomienda estudiar el origen de este tipo de materiales.

Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena. (Aguirre Castellar L. & Arrieta Torres A. 2014)

En esta investigación se buscó establecer si los materiales que se usan actualmente en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicana en Cartagena son los adecuados, a través de una comparación de sus características físicas y mecánicas con los materiales originales, en este caso estudiaron el ladrillo, madera y el mortero. Los materiales originales fueron extraídos de una casa colonial del centro histórico de la ciudad (Obra Pía) y los materiales actuales son los que en ese momento se conseguían comercialmente (provenientes de la Ferretería Antioquia, Ladrillera Bayunca, Maderas Carrillo, Yadira Paternina). Por último, se desarrollaron ensayos destructivos y no destructivos sobre estos materiales, ensayos como resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al corte, peso específico y desgaste, entre otros. De los resultados encontrados se mostraron conclusiones que son importantes mencionar, en primer lugar, los ladrillos disponibles en la Ferretería Antioquia y la Ladrillera bayunca no son los más adecuados para la restauración, estos no presentaban las mejores propiedades mecánicas y físicas en comparación con los ladrillos de la Obra Pía; En ésta última se encontraron ladrillos que alcanzaron una resistencia de $41,1 \text{ Kg/cm}^2$, en comparación con el ladrillo de la ferretería Antioquia que presentó una resistencia de $22,3 \text{ Kg/cm}^2$, registrando una diferencia de 45,79%. Y, en segundo lugar, se encontró que la Cal Nare es la más apropiada para su uso en procesos de restauración, los resultados arrojaron que este mortero resistió $73,5 \text{ Kg/cm}^2$, un valor 22% mayor a lo



alcanzado con los morteros realizados con Cal proveniente de la Ferretería Antioquia, que registraron un valor de $57,1 \text{ Kg/cm}^2$. Esta investigación tiene una limitación al estudiar pocas fuentes de materiales, solo se encarga de analizar algunos materiales (3 tipos de ladrillos, 2 tipos de cal) cuando comercialmente hay muchas fuentes que pueden analizarse y determinar la que mejores resultados arroje. Adicionalmente, en esta investigación nunca se estudia el comportamiento de muretes de ladrillo con argamasa (como los que se encuentran en algunas casas coloniales de la ciudad).

Comparación de resistencias a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y fortificaciones del centro histórico de Cartagena de Indias, y muretes fabricados bajo criterios de construcción semejantes (Camargo Bocanegra A. & Gamarra Torres J., 2016)

En esta investigación se comparó la resistencia a la compresión que presentaban en la actualidad los muros de mampostería colonial mixta o de tipo cascoteo que se conserva en algunos tramos de la contraescarpa de la muralla y edificaciones del centro histórico de la ciudad, con las generadas por muretes de mampostería construidos a manera de réplica con materiales que se destinan en la actualidad para llevar a cabo obras de conservación del patrimonio.

En la etapa de experimentación del proyecto se desarrollaron pruebas in situ y ensayos de laboratorio. Se ensayaron a compresión tres grupos de muretes; los elaborados con materiales disponibles en la actualidad, los realizados con materiales antiguos reciclados de mampostería original y los extraídos de una edificación colonial dentro del centro histórico de Cartagena. Se encontró que la resistencia generada por las muestras de materiales actuales ($4,46 \text{ Kg/cm}^2$) resultó menor que las obtenidas de las muestras hechas con materiales antiguos ($10,98 \text{ Kg/cm}^2$) y la correspondiente a muestras extraídas ($6,26 \text{ Kg/cm}^2$). Se emplearon ensayos no destructivos de ultrasonido en muretes y contraescarpa de la muralla obteniendo resultados de hasta 10 veces mayores a los presentados en pruebas destructivas, demostrando así la impertinencia de los métodos de ultrasonido en este tipo de mampostería colonial. Las resistencias de todos los ensayos destructivos oscilaron entre $3,78 \text{ Kg/cm}^2$ y $12,89 \text{ Kg/cm}^2$, valores bajos en comparación a investigaciones previas. Se encontró que la argamasa es el elemento que determina las fallas de las muestras, por lo que este tipo de muretes debe ser fabricado con la mejor cal que se pueda obtener. El promedio de los resultados de ultrasonido en muretes y contraescarpa fue de $79,05 \text{ Kg/cm}^2$, mientras que la media de los obtenidos en pruebas de compresión fue de $7,23 \text{ Kg/cm}^2$, es decir, los valores encontrados por el método no destructivo son aproximadamente 10 veces mayores a los que realmente presentó la mampostería colonial mixta. Por lo que se concluyó que el ensayo de ultrasonido no es un método acertado, recomendado o confiable para la medición de propiedades en la mampostería colonial mixta. También se concluyó que la ecuación de la NSR-10 para calcular el módulo de elasticidad en muros de mampostería no aplican para mamposterías de tipo colonial, los resultados encontrados experimentalmente y los propuestos por las ecuaciones de la norma para el módulo de elasticidad tienen valores de



88,56 Kg/cm² y 6449,39 Kg/cm² respectivamente, observándose una diferencia muy grande entre estos valores. Entre las limitaciones de este ensayo se puede mencionar el tamaño de las muestras, para cada tipo de murete ensayado sólo se hicieron 3 ejemplares, sin embargo, no se podía pretender contar con mayor cantidad de materiales rescatados puesto que su disponibilidad depende de las obras de remodelación que se vayan a realizar en las casas coloniales. Además, en esta investigación se observó un cierto grado de relación directamente proporcional entre las resistencias obtenidas por compresión simple y las velocidades de pulso halladas con los ensayos de ultrasonido, aun sabiendo que la resistencia calculada por el equipo de ultrasonido es muy alta en comparación a la resistencia real de dichos muros, hay posibilidad de correlacionar los resultados de ambos ensayos, es decir, establecer la resistencia a la compresión del muro de mampostería colonial con el ensayo de ultrasonido.

Análisis comparativo de resistencias a compresión en muros de mampostería, por medio del uso de fibras de carbono y basalto para procesos de restauración y conservación. (Acuña Caro A. 2018)

Por medio de la presente investigación se buscó determinar la conveniencia de la utilización de un tipo de FRP (fibras poliméricas de refuerzo) teniendo como parámetro de comparación ensayos de compresión sobre los especímenes construidos con materiales típicos de la región, procurando evitar el colapso a causa de deslaminación y esperando que se produzca un aumento de la ductilidad, resistencia y modificación del tipo de falla en la mampostería. La investigación se basó en información recolectada en referencias bibliográficas y en ensayos experimentales. Estos últimos incluyeron ensayos físicos a los materiales como: desgaste, humedad, absorción y gravedad específica; de igual manera se analizaron las características del mortero o argamasa, que demarcaron un punto de partida para el análisis final de los resultados obtenidos. Posteriormente se llevó a cabo la construcción de 9 muretes en total, manteniendo las proporciones indicadas, bajo las condiciones sugeridas y siguiendo las técnicas de construcción que permitieran obtener unos especímenes realizados con un material ciclópeo, típico de las edificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena de Indias; de los cuales, 3 se ensayaron destructivamente sin ser reforzados, 3 se ensayaron reforzados con CFRP (fibra de carbono) y 3 reforzados con BFRP (mallas de basalto), lográndose resistencias finales iguales a 3,69 Kg/cm², 4,98 Kg/cm² y 5,29 Kg/cm² respectivamente, por lo que se pudo concluir que bajo las mismas condiciones y sometidos a esfuerzos de compresión; los muros presentan un mayor aumento de resistencias reforzados con BFRP (mallas de basalto). El tipo de falla en todos los casos fue la misma, los materiales fallaron mucho antes que el material de refuerzo, no se presentó deslaminación en las fibras de refuerzo y quien presidió la falla fue siempre el mortero, propiciando un desprendimiento total en los materiales, demarcado en la junta de unión.

Adicional a esto, se realizaron ensayos de ultrasonido sobre la totalidad de los muros, lo que permitió realizar un análisis de resistencias entre los resultados obtenidos mediante ensayos



destruictivos y no destruictivos, obteniéndose una discrepancia considerable (resistencia igual a 35,56 Kg/cm²), que permitió concluir que bajo las condiciones del material heterogéneo o concreto ciclópeo; estos últimos ensayos no son ideales, y la comparación resulta bastante inapropiada. Entre las conclusiones se encontró que la NSR-10 no es aplicable para determinar propiedades mecánicas en los muros de concreto ciclópeo y podría esperarse que, en ningún tipo de mampostería colonial, los resultados del cálculo experimental del módulo de elasticidad y el valor calculado con las ecuaciones de la norma fueron de 1424.67 Kg/cm² y 2770 Kg/cm² respectivamente. Así como en el estudio anterior, en esta investigación el tamaño de las muestras era muy pequeño, por lo que deberían hacerse estudios con un mayor número de datos, para comprobar que las conclusiones a las que se llegó son válidas. Una observación importante entre los resultados de este estudio fue el aumento de resistencia a la compresión que desarrollaron los muretes cuando se adicionó el refuerzo con fibra de basalto, teniendo en cuenta que esta fibra se usa para mejorar el comportamiento por esfuerzos de tracción y flexión, se desconoce si este aumento en la resistencia a la compresión se debió por efectos de la misma fibra o si fue gracias a la resina que se usó para fijar la fibra de basalto a la matriz del murete. Gracias a este resultado, surge la duda de saber si es posible aumentar la resistencia a la compresión tan solo adicionando un pañete con buena resistencia a los muretes (en este caso mortero a base de cal reforzado con fibras).

1.2 ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que en la presente investigación se desea analizar el desempeño de muros de mampostería colonial cuando se le aplica un revestimiento de mortero a base de Cal reforzado con fibras, a continuación, se presentan las diferentes investigaciones realizadas a nivel internacional donde se estudia el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los morteros a base de cal. Cabe recalcar que no se encontró ningún estudio donde analizaran los muros antiguos revestidos o reforzados con morteros a base de cal con adición de fibras, todos los investigadores se limitaban al análisis de las propiedades mecánicas de los morteros a base de cal con el objetivo de evaluar si estos podían ser utilizados para procesos de restauración.

Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars (Izaguirre A., Lanas J. & Alvarez J. 2011)

En este estudio se investigó el comportamiento de los morteros a base de cal aérea con adición de fibras de polipropileno y se analizaron diferentes propiedades de la mezcla tanto en estado fresco como en estado endurecido, entre estas se pueden mencionar la resistencia mecánica, la ductilidad de la mezcla, la permeabilidad de vapor de agua, la durabilidad frente a ciclos de congelación y descongelación, entre otros. De los resultados obtenidos, se encontró que el uso de pequeñas dosis de fibra de polipropileno puede mejorar en gran medida las propiedades de las mezclas a base de cal aérea, pero llega un punto donde utilizar grandes



dosis de esta fibra puede ser contraproducente para la misma mezcla. Para ser más precisos, cuando se utilizó una dosis de 0.06% de fibra de polipropileno (porcentaje con respecto al peso de la cal aérea) se obtuvo un mortero más compacto en comparación con el de referencia (sin fibras de refuerzo), consecuentemente su permeabilidad al vapor de agua era menor y se obtuvo una mayor resistencia mecánica, además, la aparición de grietas generadas por la retracción plástica de la mezcla fue mucho menor y la durabilidad frente a ciclos de congelación y descongelación también mejoró. Adicional a lo dicho anteriormente, cuando se utilizó una dosis de 0.5% de fibras, las grietas se eliminaron completamente, pero la mezcla requería una mayor cantidad de agua de mezclado para alcanzar una buena trabajabilidad, por tanto, el mortero resultante tuvo una cantidad sobresaliente de poros. En estas dosis grandes, la adición de polipropileno generó un detrimento de la resistencia mecánica que conllevó a una mayor permeabilidad de vapor de agua, aunque el agrietamiento y durabilidad (frente a ciclos de congelación y descongelación) mejoraron notoriamente. Una limitación observada en esta investigación fue la poca variabilidad en las dosificaciones ensayadas, para realizar las mezclas de mortero a base de cal reforzado con fibras solo se usaron 2 dosificaciones distintas, es posible que exista una dosificación de fibras donde se alcancen resultados aún mejores, pero en esta investigación no se evalúa esa posibilidad.

Fibre-reinforced lime-based mortars: A posible resource for ancient masonry restoration (Lucolano F., Liguori B. & Colella C. 2013)

En este estudio se analizan las propiedades físico mecánicas y la microestructura de los morteros a base de cal hidráulica reforzados con fibra y se comparan con el comportamiento que presentan estos morteros sin reforzar. Encontrándose que en todos los casos la adición de fibras al mortero aumentó la porosidad de este y su resistencia mecánica disminuyó. Sin embargo, sin importar la concentración de fibras que se adicionara y la naturaleza de estas, se encontró que todos los morteros reforzados presentaban una mejoría en su comportamiento después del agrietamiento, el material dejaba de tener un comportamiento frágil y se convertía en un material dúctil. Se demostró que la adición de tan solo el 2% de fibra de vidrio conlleva a un endurecimiento del mortero (0,08 MPa) y conjuntamente a un aumento en la resistencia a la flexión (2.41 MPa). Finalmente se concluye que los morteros examinados pueden ser propuestos como materiales para la reparación de estructuras históricas, ya que combinan la buena compatibilidad natural con las construcciones ancestrales con una buena resistencia a los ciclos de hielo y deshielo y además un comportamiento mecánico razonable después del agrietamiento. En esta investigación existe una limitación similar al estudio mencionado anteriormente, entre las dosificaciones estudiadas solo se evaluaron la adición de fibras de vidrio y de basalto en concentraciones de 1% y 2% para cada tipo de fibra, quizás se podrían haber estudiado más tipologías de fibras o un mayor número de dosificaciones, pero entre el alcance de este estudio no se tuvo en cuenta esta posibilidad.



Analysis of the strain-rate behaviour of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar (Asprone D., Cadoni E. & Prota A. 2014)

En este estudio se presentan los resultados de una caracterización dinámica de los morteros hidráulicos naturales reforzados con fibras de basalto. Se lleva a cabo una caracterización morfológica del mortero y se realizan ensayos para verificar la resistencia a la tracción de los morteros reforzados. Entre los resultados se encontró que el proceso de añadir fibras se genera un efecto de puente entre la matriz del mortero y las mismas fibras, consecuentemente se presenta un comportamiento mucho más dúctil y una mayor dureza en los morteros reforzados con fibras en comparación a los morteros sin reforzar. En oposición a estos resultados se encontró que la resistencia mecánica de los morteros disminuyó en todos los casos que se añadieron fibras para reforzar el mortero, de hecho, a medida que la cantidad de fibras aumentaba, la resistencia mecánica de los morteros hidráulicos naturales disminuía. Finalmente se llegó a la conclusión que reforzar morteros con fibras de basalto es una alternativa viable para contrarrestar el efecto de las cargas dinámicas (sismos, impactos laterales o explosiones) gracias a la mayor ductilidad que se obtiene con estas fibras. Como limitante se observó que los autores no encontraron una dosificación óptima de fibras para reforzar los morteros hidráulicos naturales, entre sus conclusiones se propone encontrar esta dosificación en futuras investigaciones.

Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition (Liguori B., Caputo D. & Lucolano F. 2015)

Este estudio se basa en los resultados de una investigación previa realizada por los mismos autores, donde se había concluido que la adición de fibra de vidrio en los morteros a base de cal hidráulica mejoraba las propiedades mecánicas de estos, por lo tanto, en la presente investigación analizan estos mismos morteros reforzados con fibras, pero con una adición de zeolita. Para adicionar a las mezclas, se seleccionó una toba rica en Phillipsita y Zeolita A (LTA). Entre los resultados se encontró que cuando se usaron las dos adiciones mencionadas se obtuvo una gran disminución en la porosidad y un aumento en el comportamiento mecánico del mortero. Particularmente se encontró que un 20% de LTA produce un incremento en la resistencia a la compresión y la flexión del 150% comparado con los morteros reforzados con fibras sin ninguna adición. Se concluyó que incorporar fibras a las mezclas de mortero reduce la resistencia a la compresión, incluso cuando se alcanza mejores comportamientos en la dureza después del agrietamiento y la resistencia a la flexión. Además, se evidenció que las adiciones zeolíticas son efectivas para reducir la porosidad del mortero endurecido. En general, se confirmó el buen desempeño de los materiales puzolánicos y zeolíticos, evidencia que promueve el importante papel que pueden jugar estos materiales en el campo de la construcción. Un detalle que se observó al utilizar la adición de Zeolita en el mortero a base de cal fue la reducción su porosidad, esta característica puede generar un aumento en la resistencia mecánica pero no se tiene en cuenta el comportamiento a largo plazo del mortero, teniendo en cuenta que en los morteros a base de cal se necesita un



constante flujo de vapor de agua (o de humedad), al disminuir su porosidad se podría estar afectando el buen comportamiento del mortero a largo plazo.

Mejoras estructurales obtenidas en morteros y hormigones de base cal hidráulica mediante la aportación de corcho y fibras de polipropileno para su aplicación en el refuerzo de estructuras históricas. (Durán Ruiz L., 2016)

En este estudio se evalúa el comportamiento de morteros a base de cal reforzados con fibras de polipropileno y granulado de corcho, el objetivo principal iba encaminado a mejorar las propiedades mecánicas de los morteros a base de Cal reforzados con fibras y evaluar que tanto se podía aligerar un hormigón a base de cal usando granulado de corcho. Entre los resultados se encontró que el uso de fibras de polipropileno disminuye la resistencia a la compresión del mortero cuando las fibras son de pequeño tamaño (12 mm) pero en los casos que se utilizan fibras más alargadas (18 mm) la resistencia a la compresión aumenta en los morteros. En ambos casos de refuerzo (con fibras pequeñas o largas) se evidenció un aumento en la ductilidad del material y se obtuvo un material con mayor resiliencia (el material dejó de ser frágil). Cuando se estudió la adición de granulado de corcho se observó que en todos los casos la resistencia a la compresión disminuía, pero se lograba el objetivo de obtener mezclas con menor densidad sin mencionar la buena adherencia entre el granulado de corcho y el mortero gracias a la rugosidad característica que tiene el corcho. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se mezclaron fibras de polipropileno y granulado de corcho conjuntamente dentro de las mezclas de mortero, para estos casos la capacidad de deformación por compresión del material aumentó. Así mismo sucedió con la capacidad de deformación por la tensión última de compresión, la rotura del material se presentó con micro-fisuras uniformemente repartidas (rotura dúctil) y su ductilidad (capacidad de absorber energía con la deformación) aumentó considerablemente. Entre las conclusiones se menciona que la mezcla óptima se pudo encontrar cuando se utilizaban fibras de 18 mm de longitud para garantizar adherencia adecuada y que la concentración óptima de granulado de corcho era no mayor al 40%.

Figura 1. Imagen de dos probetas rotas a compresión en prensa. Aligerado con métodos convencionales (izquierda) y reforzado con fibras de polipropileno más granulado de corcho (Derecha).



Fuente: Durán Ruiz L. 2016



Influencia de la adición de fibras en las propiedades de los morteros de cal hidráulica (Bustos García A., Moreno Fernández E., Gonzales Yunta F. & Cobo Escamilla A. 2018)

En este estudio se analiza el efecto que tiene la adición de fibras de carbono y de basalto sobre los morteros a base de cal hidráulica. El objetivo principal era estudiar características del mortero, así como sus propiedades mecánicas. En los resultados se encontró que la adición de fibras en cualquier caso afecta significativamente el comportamiento y las propiedades de los morteros de cal hidráulica. Entre las conclusiones de este estudio se encontró que: la consistencia del mortero disminuye considerablemente con la adición de fibras, a mayor cantidad de fibras añadidas también aumenta el aire incluido y disminuye la densidad aparente de los morteros. El contenido de 1% de fibras de carbono fue la concentración óptima donde se encontraron mejores resultados, se observó que los morteros reforzados con fibra de basalto presentaban menores valores de resistencia a la flexión (3.5%) pero mayor resistencia a la compresión (24.6%). Además, se encontró que la ductilidad de los morteros reforzados con fibras era mucho mayor que los morteros sin reforzar. Por último, se encontró que, en los ensayos de durabilidad, la ductilidad de los morteros reforzados con fibras disminuía en un 75% pero incluso con esta pérdida los valores de ductilidad siguen siendo mayores que en los morteros sin reforzar. En este estudio, aunque se logra obtener una dosificación óptima para las fibras utilizadas, es posible que dicha dosificación varíe dependiendo del tamaño de fibras a utilizar, los autores usaron en todo momento fibras de 12 mm, es posible que dicha dosificación óptima varíe cuando se adiciona fibras alargadas (de 18 mm).

Mechanical properties of lime-based mortars reinforced with plasma treated glass fibers (Trejbal J. 2018)

En este estudio se analizaron las propiedades mecánicas de los morteros a base de Cal reforzado con fibra de vidrio tratadas con un grabado de plasma de oxígeno, el objetivo principal de esta investigación era observar cómo se comportaba el mortero cuando las fibras de refuerzos adicionadas a éste eran modificadas en su superficie, en específico, removiendo la capa blanda de recubrimiento a base de polímeros que se forma alrededor de la fibra en su proceso de fabricación industrial y que repercute en la capacidad de adherencia de la fibra con la matriz del mortero. Diferentes propiedades fueron estudiadas, tales como: la morfología y humectabilidad de las fibras tratadas, porosidad de los morteros reforzados con dichas fibras y además se hizo un análisis de la resistencia mecánica de estos morteros por medio de ensayos destructivos. Todos los resultados se compararon con los resultados de morteros a base de Cal reforzados con fibras sin ningún tratamiento en la superficie (mortero reforzado de referencia).

Entre los resultados se encontró que en las fibras de referencia había una baja humectabilidad, el ángulo de contacto medido en la interacción de dichas fibras con el agua fue de $78.3 \pm 9.0^\circ$



y después de 2 minutos de tratamiento se encontró el cambio más significativo, donde el ángulo de contacto de la fibra tratada alcanzó un valor de $43.5 \pm 7.0^\circ$. En los análisis morfológicos se encontró que luego de 8 minutos de tratamiento de la superficie las fibras perdían todo su recubrimiento que la protegía de daños mecánicos. Adicionalmente, desde el punto de vista químico, el tiempo de tratamiento óptimo era de 1 minuto, puesto que, aunque la humectabilidad solo mejorara entre un 10 a 11% las fibras no se deben tratar de manera más intensiva, debido al excesivo descascaramiento generado en su superficie. En el ensayo de porosidad se encontró que no había un cambio significativo entre el uso de las dos fibras (las tratadas y las de referencia), alcanzando valores de $36.2 \pm 0.8\%$ y $35.8 \pm 0.2\%$ respectivamente. En los ensayos destructivos se encontró que los morteros reforzados con fibras tratadas con plasma presentan un comportamiento mecánico peor que aquellos con fibras sin tratar, en el mejor de los casos se encontró que la máxima resistencia alcanzada durante los ensayos de carga fue de 5.5 y 5.9 KN para aquellos morteros reforzados con fibras sin tratar y tratadas con plasma respectivamente. Finalmente se concluye que el uso de fibras tratadas en su superficie tiene un desempeño más débil en los morteros a base de cal en comparación con las fibras no tratadas y no se recomienda realizar este procedimiento. Entre los limitantes observados en esta investigación se encuentra el tratamiento que se le dio a las fibras para modificar sus características superficiales, se pudo utilizar otra metodología que generara mejores resultados (tratamientos físicos que aumenten la rugosidad superficial de las fibras sin necesidad de desgastarlas).

Characterization of aerial lime-based mortars with addition of biopolymers (Žižlavský, T., Vyšvařil, M. & Rovnaníková, P. 2018)

En esta investigación se estudia el efecto generado por la adición de diferentes biopolímeros que mejoran la viscosidad de las mezclas de mortero a base de Cal aéreo. Se analizó la mezcla de mortero en estado fresco para verificar la viscosidad alcanzada con cada adición y en estado endurecido se evaluaron las propiedades físico mecánicas del mortero. El objetivo era verificar propiedades como la trabajabilidad, la retención de agua, la densidad y el contenido de aire en el mortero fresco. Así mismo, se observó la densidad aparente, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión del mortero endurecido al adicionar biopolímeros como: goma diutana, goma gellan, goma xantana, carragenina y sal sódica del ácido algínico. De acuerdo a los resultados, se encontró que en estado fresco la mayoría de adiciones actuaron como agentes plastificantes con diferentes efectividades, la única excepción fue la goma gellan que no generó un impacto significativo en la viscosidad del mortero. Observando los valores del contenido de aire en las mezclas de mortero y sus densidades, se deduce que estos no se vieron afectados por la adición de biopolímeros, por lo que para morteros a base de cal aéreo no se puede considerar que dichas adiciones generan una inclusión de aire a la mezcla. Finalmente, todas las mezclas disminuyeron la resistencia a los 7 días en comparación con los morteros de referencia, esto puede atribuirse a la función de retención de agua de las adiciones. Después de 28 días, la goma diutana y la carragenina mostraron resultados comparables con los valores de resistencia a la flexión del mortero de referencia. En general se observó que la adición de biopolímeros causó cierta disminución



en las resistencias en comparación con los morteros de referencia, pero esta tendió a disminuir con el paso del tiempo. Además, para todas las adiciones utilizadas se observó un gran aumento en la manejabilidad del mortero en estado fresco.

Autores/fecha	Resumen de sus hallazgos
España, Puello & Mendoza (2009)	En el planteamiento teórico se concluyó que las combinaciones de mezcla con mayor porcentaje de ladrillo militar presentan mejores resistencias mecánicas (sabiendo que se componen de piedra caliza, coralina, ladrillo militar y argamasa). No se hizo comprobación experimental del planteamiento.
Meza & Cohen (2011)	Se concluyó que en la cantera Coloncito se encuentra la piedra caliza más adecuada para procesos de restauración, los ladrillos militares estudiados no presentaron diferencias sustanciales cuando se compararon diferentes fuentes y la argamasa presentó un mejor comportamiento cuando se realizaba con una proporción cal:arena de 1:2.
Cuevas y Herrera (2013)	Presentaron valores aproximados para la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería colonial tipo IV, más importante aún, concluyeron que las ecuaciones y lineamientos planteadas por la normativa colombiana (NSR-10) no es aplicable a estructuras antiguas como la mampostería colonial.
Camargo y gamarra (2016)	La resistencia mecánica de muretes de mampostería colonial tipo I construida con materiales actuales es de aproximadamente 4.4 Kg/cm ² , usando proporciones de 1:2:4 (argamasa: piedra caliza + pómez: ladrillo militar). Los materiales antiguos tienen mejores propiedades mecánicas que los actuales. El ensayo de ultrasonido no es aplicable en muretes de mampostería colonial. La argamasa es el material que gobierna la falla de la mampostería colonial.
Acuña A (2018)	Al reforzar muretes de mampostería colonial tipo I con dos diferentes tipos de refuerzo, se encontró que el uso de fibras de basalto aumenta en mayor magnitud la resistencia mecánica en comparación con la fibra de Carbono. Con ambos tipos de refuerzo de obtenían mejores resultados que con los muretes sin reforzar. La falla principal siempre fue la misma, el



Autores/fecha	Resumen de sus hallazgos
	desprendimiento de los agregados con el material aglomerante (argamasa). No se pudo aplicar la normatividad colombiana NSR-10 a los muretes de mampostería colonial
Izaguirre, Lanas & Álvarez (2011)	Cuando se agregaron fibras de polipropileno con una proporción de 0.06% al mortero a base de cal aérea se obtuvo una mezcla de mortero más compacta, menos permeable, con mayor resistencia mecánica y en la que se disminuyó la aparición de grietas por retracción plástica. Al usar mayores proporciones de fibras se obtenían muestras porosas por la mayor cantidad de agua que debía agregarse para obtener una adecuada trabajabilidad y la resistencia mecánica disminuía.
Lucolano, Liguori & Colella (2013)	Al analizar fibras de vidrio y fibras de basalto adicionadas a los morteros a base de cal hidráulica se encontró que: cualquier adición de fibras a la mezcla de mortero generaba una disminución de la resistencia mecánica de la mezcla. Sin embargo, al adicionar estos materiales se obtenía un mejor comportamiento en las mezclas después del agrietamiento, los morteros dejaban de ser frágiles y adquirían cierta ductilidad.
Aspone, Cadoni & Prota (2014)	Al caracterizar los morteros hidráulicos naturales con fibras de basalto se encontró que: la adición de fibras al mortero generaba un puente entre la matriz del mortero y las mismas fibras que lo convertían en un material más dúctil, sin embargo, en todos los casos estudiados la resistencia a la compresión disminuía como efecto secundario de la presencia de fibras. Se recomendó el uso de estas fibras para morteros que vayan a resistir cargas dinámicas, sismos laterales, explosiones, entre otras.
Durán L (2016)	En esta investigación se encontró que la adición de fibras de polipropileno puede reducir la resistencia mecánica de morteros a base de cal cuando dichas fibras son de tamaño pequeño (12 mm) pero cuando las fibras son más alargadas (18 mm) la resistencia puede aumentar. Además, sin importar el tamaño de fibras adicionadas, los morteros adquirirían mayor resiliencia y su falla dejaba de ser frágil.



1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 La Ingeniería De Cartagena De Indias¹

El estilo arquitectónico civil en las construcciones de Cartagena, es el reflejo de las tendencias elitistas que se representaban en impresionantes fortificaciones, tendencias clave que fueron determinantes para construir un sistema de murallas, demostrando todo su esplendor mediante majestuosos diseños y construcciones militares.

Es importante enfatizar en que la mejor mano de obra, constructores, albañiles de la ciudad y mejores maestros de obra, estarían muy ocupados en esta ardua actividad de erigir fortificaciones, por lo tanto, pocos constructores estarían disponibles para construir casas, u otras edificaciones, en dado caso que se pensara en construir alguna obra civil; situación que conllevaría a no obtener la mejor mano de obra, pues no sería de las más calificadas, lo que puede comprobarse en el impecable estado de las fortificaciones que exigían la mejor mano de obra, así como los mejores materiales de construcción. Tener materiales de buena calidad dependía principalmente de que tantos recursos económicos disponía una familia, refiriéndose a la arquitectura doméstica. Para el caso de aquellas obras importantes como iglesias y fuertes, los materiales debían ser revisados minuciosamente por los ingenieros militares y maestros canteros de la época. La base de estos buenos materiales fue la fortaleza que presentaba la industria de los hornos; los que permitieron construir una gran cantidad de fortificaciones tanto en Barú, como en la isla de Tierra Bomba facilitando la creación de los fuertes; y concentró la obtención de materiales en estos últimos, haciendo a un costado las viviendas residenciales y las iglesias; por esta razón, el fuero militar en Cartagena definió la diferencia de calidades entre las obras militares y civiles; además, limitó estos edificios a la severidad y a la rústica imperfección de la cual, el producto generado por los hornos: La cal, era el principal material, que además de definir la arquitectura doméstica de la ciudad, también se estableció como la técnica que demarcaría la belleza del centro histórico de Cartagena de Indias, qué, por suerte para la historia, aún subsisten en muchas obras no militares de la ciudad.

Tan solo pensar en la puesta en obra de tantas construcciones que incluyen iglesias, casas residenciales, fortificaciones, diques y obras hidráulicas; genera la necesidad de contar con materiales que tengan las condiciones necesarias en aquel tiempo y lugar que proporcionaran la resistencia y durabilidad que cada obra demandaba. Por esto, en las edificaciones se tomó como materia principal la piedra caliza y la cal de las canteras. Esta última servía para hacer hormigones o pegar los morteros, los que se observan por todas las juntas de construcción en cada muro, realizados en 300 años, a partir de los materiales suministrados por la gran red de

¹ Cabrera A. & Martinez R. Técnicas Ancestrales de Construcción en el Mudéjar Cartagenero. Cartagena de Indias.: Libro Inédito, En Edición. (1990)



canteras, tejares y campamentos de trabajo; de los que hasta el momento se han ubicado 37 en los que se deshidrataba la piedra caliza; estos se han identificado de aproximadamente unos 50 hornos usados en la colonia en total. Si se hubiese dedicado principalmente a obras civiles, podríamos asegurar que Cartagena, entre todas, sería una de las ciudades con más esplendor en toda América.

Pero es importante afirmar también, que, si Cartagena de Indias no hubiera contado con su potencial militar, y por tanto la industria de hornos, si la corona española no hubiera estado interesada en esta, se estaría observando un anónimo villorrio de la cosca caribe colombiana. Sin embargo, la ciudad que hoy permanece, consiste en la grandiosa infraestructura construida y desarrollada en ese período colonial.

1.3.1.1 Materiales antiguos de construcción

Los centros usados para producir materiales, eran en la época colonial una industria muy grande conformada por haciendas, estancias y campamentos con muchas funciones como canteras, tejares, hornos de cal y ladrillos, albercas de apagado de cal, aljibes, brocales de pozos de agua, casa del capataz, cocina y casa de médicos. También había galpones dispuestos para el almacenamiento de material y viviendas para quienes trabajaban en la explotación y producción de materiales.

Con una ubicación estratégica cercana a los cuerpos de agua, para facilidad de transporte y protegidos por la vegetación frondosa en sus alrededores, los yacimientos se aprovechaban sin importar la dificultad de su explotación o el transporte, sino la buena calidad de este.

Los materiales usados en el período colonial fueron principalmente:

1.3.1.2 La cal

Conocida también como cal viva, denota las estructuras químicas que puede presentar el óxido de calcio. Resulta de calcinar rocas calizas y al entrar en contacto con el agua se apaga o hidrata, en cambio, con desprendimiento de calor y al mezclarse con arena, forma el mortero o argamasa.

Por su parte, la cal hidráulica es aquella que tiene la posibilidad de fraguar con o sin presencia de aire, hasta debajo del agua. Es producida por la calcinación de piedras calizas en cuya composición, entra aproximadamente un 20% de arcilla, y que, al pulverizarse y mezclarse con agua, endurece como el cemento. La cal hidráulica es un cemento natural.

Entre las propiedades de la cal hidráulica, se encuentra la de formar un hormigón cuando esta se amasa y se mezcla adecuadamente con agregados y agua. Hormigón que puede mantener



su trabajabilidad durante un tiempo suficiente para después de un determinado período, alcanzar su resistencia específica y una estabilidad de volumen a largo plazo.

La cal utilizada en Cartagena era en su totalidad de una gran calidad y se usaba para pegar ladrillos, sillares, pañetes, bóvedas, estucos, solados de argamasa, entre otros. Las rocas calizas puras compuestas por carbonato de calcio, eran las piedras ideales para obtener cal viva. Este era el elemento más importante para construir todo tipo de obras durante el período colonial.

Las principales propiedades que brinda el adicionar cal a la mezcla de mortero son:

Adherencia: La cal permite mayor adherencia entre el mortero y las unidades de mampostería.

Trabajabilidad: La cal permite al mortero ser moldeable incluso al contacto con unidades porosas y muy absorbentes. Esta característica se debe directamente a la gran capacidad de la cal de retener agua por su mayor área superficial y la forma aplanada de las partículas, permitiendo que exista más lubricación en la mezcla y por lo tanto mayor manejo.

Flexibilidad: al adicionar cal a la mezcla de mortero, ésta permite movimientos entre piezas.

Curado de fisuras: Los morteros con cal tienen la capacidad de autorepararse ya que al reaccionar con el agua éste puede salir a través del agua de evaporación, generándose una lechada en las fisuras y haciendo que éstas se sellen.

Tipos de Cal:

- **Cales aéreas:** son aquellas que endurecen mediante la carbonatación al exponerse al aire. Proviene de la calcinación de piedras calizas de elevada pureza, contiene más del 95% de óxido de calcio (CaO), es decir, no tienen más del 5% de impurezas y producen una pasta con alta untuosidad. Otro tipo de cal proveniente de rocas magnesianas (dolomitas) que pueden contener hasta un 50% de MgO y solo un 10% de CaO. Dependiendo del origen de las calizas también pueden contener arcilla y estas se caracterizan por producir una pasta menos untuosa que las anteriores. (TRICAT, 2008)

- **Cales hidráulicas:** son las que endurecen tanto en contacto con el aire como en el agua. Su origen está en piedras calizas que contienen de un 5 a un 22% de arcillas; llegan a contener mezclas margas y arcillas ricas en sílice, aluminio y hierro. En el apagado de la cal hidráulica se hidrata la cal libre y no los silicatos o aluminatos de calcio. Si se produce la hidratación de estos compuestos el material resultante no tendrá propiedades hidráulicas y se llamarían cales ahogadas. De hecho, se trata de una característica similar a la denominada *puzolana*, una roca rica en sílice, alumina y óxido de hierro, que al agregarse a la cal área le daba la capacidad de fraguar en medio acuoso. Este tipo de cal dan mayores resistencias mecánicas en menor tiempo que las cales aéreas. (TRICAT, 2008)



1.3.1.3 Rocas Calizas

Son rocas de origen sedimentario principalmente químico, formadas por lo menos en un 50% de carbonato cálcico. Son producidas por la caída del carbonato cálcico con la ayuda del agua en un proceso inorgánico y/o bioquímico. Las de origen bioquímico son formadas por los seres vivos; estos fijan el calcio que está disuelto en el agua y lo usan para construir sus esqueletos en forma de calcita, luego que estos seres mueren, sus esqueletos se convertirán en unas calizas formadas por calcita, también se depositan calizas en el fondo marino por consecuencia del metabolismo de los seres vivos.

Tanto en Cartagena como en el resto del Caribe, usar la piedra caliza fue de primordial importancia, su composición podía variar en algunas islas, así como su dureza. En el caso de Cartagena, la ciudad contaba con blandas, semiduras o duras, dependiendo de la cantera que fuera explotada. A lo largo de la historia, la mayor explotación de esta roca se dio en las laderas de la popa, donde se encontraba la denominada cantera de Tesca, otro yacimiento importante fue la cantera de Tierra Bomba, adicionalmente, una cantera explotada en esa época era la hacienda Púa en Arroyo de Piedra y otra, de menor tamaño, pero con una especial característica química, ubicada en el perímetro de la Bahía de Cartagena.

En la actualidad, esta roca se encuentra en las colinas de Albornoz, incrustadas de forma horizontal sobre arcillas y otras rocas presentes en sus valles, ubicados a 8 Km de la ciudad amurallada, sobre la carretera que va hacia el complejo industrial de Mamonal y contiene unas reservas de aproximadamente 75 millones de toneladas. Otro yacimiento muy importante es el de Turbaco, se estima que tiene una reserva de 1450 millones de toneladas actualmente, tomando como base un área de 58 Km².

1.3.1.4 Argamasa

Es el mortero a base de cal y arena, se utilizó en todos los sistemas constructivos hasta mediados del siglo XIX cuando apareció el cemento portland. La argamasa que se utilizaba en las fortificaciones de la ciudad era de diferentes tipos, entre estas se encuentra: para pega o levante, para repellos y para pisos o solados. En la mezcla de argamasa es muy importante el uso de los agregados, aquellos materiales naturales como la gravilla, la arena y la grava.

La dosificación entre Cal y arena variaba entre las diferentes mezclas, dependiendo del tipo de construcción y la obra en la que se utilizara; entre esta variedad de dosificaciones, la relación volumétrica que más se utiliza establece una parte de cal por dos partes de arena lavada de río. (1:2)

Las arenas a usar son las provenientes de ríos o arroyos, estas se catalogan como las mejores, las arenas de mar debían ser lavadas con agua dulce o en su defecto con 2 o 3 inviernos.



En Cartagena se utilizaba el hormigón, un tipo de mezcla ciclópea que aparte de llevar cal y arena, se le añadía pedazos de piedra burda y cascajos de ladrillo militar con una relación de 1:2:4 respectivamente para cada material (Herrera Díaz, 2009).

1.3.1.5 Ladrillo o Tableta Militar

Este es el elemento más importante dentro de la albañilería perteneciente a la ciudad de Cartagena, se presenta en diferentes medidas y proporciones, es llamado normalmente como “*tolete*”, cuyas proporciones son derivadas de la vara castellana y es llamado “*ladrillo militar*” por el español Juan Manuel Zapatero, esto debido a su frecuente uso en las diferentes fortificaciones de la ciudad; sus dimensiones son 30x15x5 cm y cuenta con una excelente calidad en cuanto a la arcilla y su cocción. Sus colores varían entre el rojo vivo y el almagre, sin descartar la existencia de otras tonalidades como ocres y amarillos azufrados.

Aparte del ladrillo militar, hay otras tejas de arcilla con diferentes dimensiones que se usaron en construcciones domésticas, particularmente en algunos muros y cubiertas de azotea. Otras dimensiones en las que existen estas tabletas son: 20x20x5 cm y 25x25x5 cm, utilizados en pisos de viviendas, patios internos, pisos para los aljibes y techos de azoteas.

1.3.1.6 Piedra Coralina

Esta es una roca formada en el lecho marino a partir de fósiles, corales y otros animales marinos, fósiles que a través de los años se asentaron en el fondo del mar; por lo que la mayoría de las calizas coralinas son originarias de arrecifes. Esta roca se utiliza desde los tiempos de la colonia para construir impresionantes fortalezas y otras edificaciones, en su mayoría obras pertenecientes a la realeza.

Comercialmente, se pueden encontrar 3 tipos de piedra coralina: porosa, semi-porosa y compacta. La más utilizada en el mercado es la piedra coralina porosa, esto debido a sus características que permiten modularla en una gama de formas muy versátiles.

1.3.2 Mampostería

Es un tipo de material heterogéneo, fácil de implementar en las construcciones y que posee características anisótropas. Este el sistema tradicional de construcción y consiste en levantar muros a partir de bloques acomodados, unos encima de otros (aparejo) unidos mediante un material aglomerante o ligante, para diferentes fines, mediante la colocación manual de los materiales o elementos que lo componen (mampuestos), estos pueden ser bloques de cemento prefabricados, ladrillos de arcilla o piedras, ya sean talladas en formas rectangulares o no.

En este sistema constructivo se reduce la producción de desperdicios en los materiales utilizados y las fachadas que se generan son capaces de portar cargas; es posible utilizarla



para construcciones en grandes alturas. Debido a su rigidez, genera pequeños daños secundarios, además que combina los beneficios de la función estética con la estructural.

La mampostería forma parte crucial en las estructuras más antiguas del planeta, se origina en la misma historia de la humanidad. Esta técnica se ha utilizado desde el año 8000 A.C., probablemente usando barro como material ligante, el cual permitió apilar y acomodar con facilidad las piedras que se usaban para construir casas. A partir de ese momento, su uso se expandió hasta alcanzar su máxima expresión en la época del Renacimiento en Europa, donde la Arquitectura Gótica tuvo un auge en la construcción de iglesias, acueductos, puentes y templos, terminando en la actualidad con la construcción de estructuras de uso muy concurrido. No obstante, aunque es un material muy antiguo también está definido como “un material que posee tantas propiedades heterogéneas que su estudio aún no está completo” (Viviescas 2009).

Hoy en día, se utiliza la mampostería para la construcción de casas, puentes, caminos, arcos, pozos, muros estructurales, entre otros, pero su uso se ve limitado debido a las condiciones sísmicas de los lugares de construcción y los requerimientos del mismo, puesto que la mampostería se caracteriza por ser muy frágil y susceptible a los efectos físicos del entorno donde se encuentra.

Por lo general, la mampostería se diseña con la capacidad de resistir cargas verticales y de cortante, pero nunca debe despreciarse su comportamiento frente a cargas de flexión, ya que cualquier muro se ve expuesto a diferentes esfuerzos ocasionados por muchos factores externos a él.

1.3.3 Muros de mampostería

Los muros de mampostería (denominados como “muros” o “mampostería”) son estructuras monolíticas construidas a base de mampuestos que tienen la función de soportar cargas verticales y horizontales, ya sea por efecto del peso propio de partes de una estructura que sobre ellos descansan, por cargas de gravedad temporales, por cargas de sismo o de viento, dentro de una edificación que ellos se encargan de formar (Viviescas, 2009).

Son estructuras fáciles de construir por la buena comunión existente entre sus componentes, los bloques se unen con facilidad al mortero. No obstante, por esa misma simplicidad, la principal desventaja que presentan estas estructuras, es que pueden ser muy inestables por fatiga o degradación progresiva de su resistencia, por lo que a lo largo de los años se han catalogado como estructuras frágiles e incapaces de soportar sismos, esto es causado por el fenómeno de reblandecimiento entre otros factores, fenómeno que representa la “pérdida gradual de las propiedades mecánicas de los elementos bajo el incremento sostenido de una carga aplicada (por lo general tensión), generando un aumento continuo en el tamaño de las micro-fisuras (dependen de cada sólido) de los bloques hasta alcanzar un total agrietamiento y el colapso del material” (Viviescas, 2009).



En la ciudad de Cartagena de Indias la mampostería de tipología colonial está clasificada en los siguientes tipos: Tipo I o muros de cascoteo formados por tableta militar, piedra coralina, piedra de coral y argamasa, Tipo II formado por piedra coralina y argamasa, Tipo III formado por tableta militar (ladrillo de 15cm x 30 cm x 4 cm) y argamasa; y el Tipo IV formado por piedra coralina, tableta militar y argamasa. (España J., Puello E. & Almanza E. 2009)

1.3.4 Introducción a las fibras²

Las fibras actuando como refuerzo secundario, mejoran las características de los concretos o morteros como la resistencia a la tracción, aportan mayor resistencia a cargas dinámica y aumentan la resistencia al esfuerzo cortante. De igual forma, con su inclusión se controla el proceso de fisuración, aumentando la resistencia a flexión, tracción y tenacidad, entendiéndose como la capacidad que adquieren los concretos para absorber energía hasta que se fracture.

Las fibras son un elemento en la construcción civil desde la antigüedad, entre los casos más representativos se encuentran: la pirámide Sakkara de Egipto (2.500 A.C.), muros de Mesopotamia (1.400 A.C.), Muralla China (214 A.C.) y las Carreteras Incas (214 D.C.). Además del concreto, hay materiales que han tenido usos estructurales similares con las fibras, tales como el adobe, la tapia pisada, los morteros de cal, entre otros.

1.3.5 Tipos de fibras

1.3.5.1 Micro fibras

Son fibras de plástico, polipropileno, polietileno o nylon, que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y previenen la formación de fisuras durante las primeras horas de colocación del concreto o mientras la mezcla permanece en estado plástico.

1.3.5.2 Macro fibras

Son elaboradas de materiales variados, tales como acero, vidrio, sintéticos o naturales, fiquen u otros, las cuales se usan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y orientado en cualquier dirección. “las fibras actúan como la mala electro-soldada y las varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del material y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento”

² Mesa Giraldo, J. (2017). *Caracterización mecánica de la fibra polimérica para reforzar concreto “polifibra” de Polyaltec LTDA*. Fundación universidad de América.



1.3.5.3 Polifibras

Es una multi-fibra sintética plástica grafilada fabricada con poliolefinas y tereftalato de polietileno (PET), diseñada para su fácil incorporación al concreto gracias a su longitud y su forma. Reemplazando así las fibras metálicas y mallas electrosoldadas de refuerzo en diversos campos de construcción

Básicamente las fibras se caracterizan por la longitud (L), por la forma y por el diámetro. De la relación entre longitud (L) y el diámetro (D) se obtiene la relación de aspecto, ($\gamma=L/D$).

- ✓ Longitud (L): Distancia entre los dos extremos de la fibra
- ✓ Diámetro (D): Es el diámetro transversal de la fibra
- ✓ Numero de fibras por kilogramo: “Se calcula con la siguiente fórmula”

$$\frac{N^\circ}{Kg} = \frac{400000}{LD^2\pi\gamma}$$

Donde;

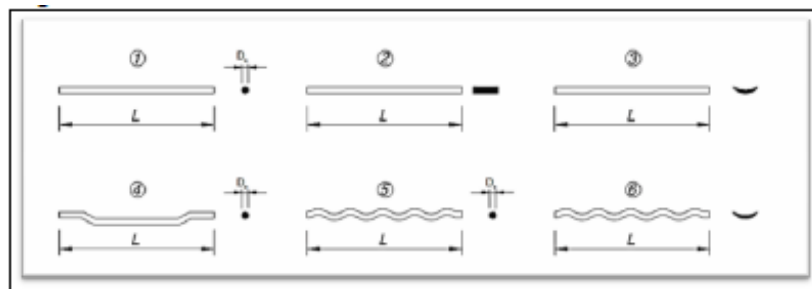
L = Longitud de la fibra (mm)

D = Diámetro de la fibra (mm)

γ = Peso específico (kg/m^3)

- ✓ Relación de aspecto: Establece la esbeltez de la fibra ($\gamma=L/D$); para un mismo diámetro de la fibra, entre mayor sea el valor de su longitud, mayor será su esbeltez, por tanto, más ligera será la fibra
- ✓ Resistencia a la tracción: Se calcula dividiendo el esfuerzo a la rotura por el área de la sección transversal de la fibra axialmente, las fibras pueden tener sección circular, rectangular o variada. En las figuras 2 y 3, se presenta un ejemplo de varias formas de fibras.

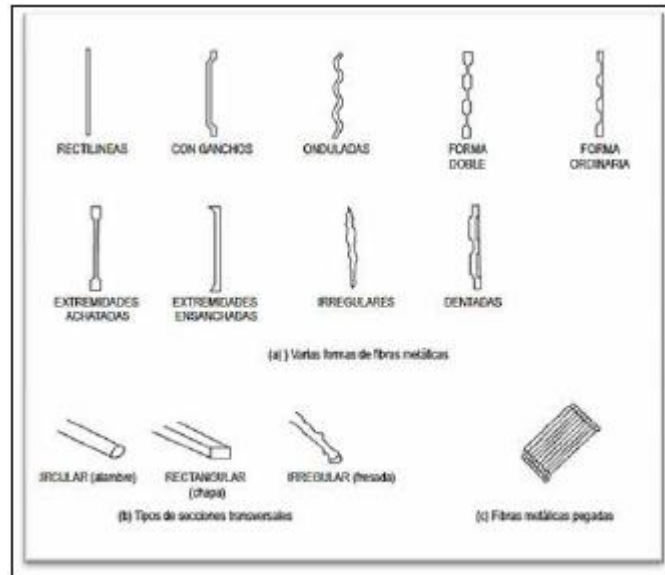
Figura 2. Diferentes formas de las fibras



Fuente. Mesa Giraldo, J. 2017



Figura 3. Formas adicionales de fibras



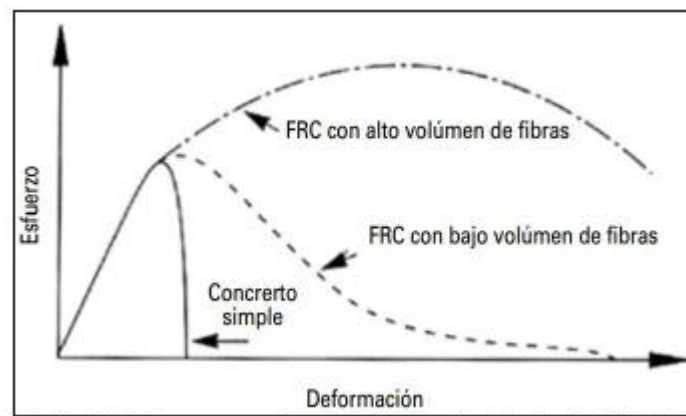
Fuente. Mesa Giraldo, J. 2017

Debido a que el uso de fibras se presenta en una mayor proporción en el reforzamiento de concretos se mencionará las características mejoradas por dichas fibras en los concretos convencionales, las propiedades que se presentan al adicionar este material son las siguientes:

Resistencia a la compresión

Esta propiedad no presenta mayor variabilidad con respecto a la adición con fibras, una vez que alcanza el esfuerzo máximo en la curva carga vs deformación presenta mayor ductilidad debido a la presencia de fibras, como se presenta en la siguiente figura

Figura 4. Comportamiento del concreto reforzado con fibras metálicas



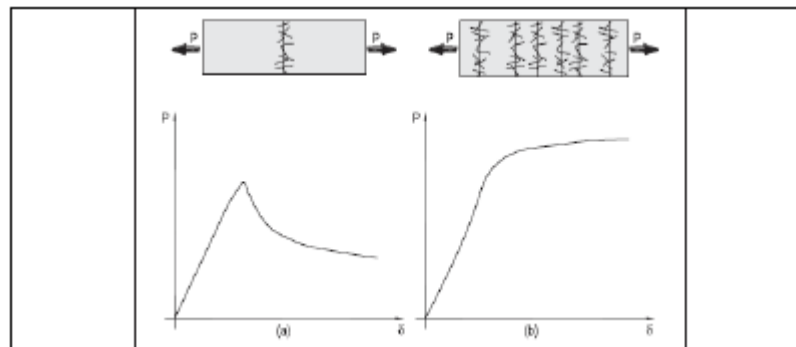
Fuente. Mesa Giraldo, J. 2017



1.3.5.4 Resistencia a la tracción

La tracción de los materiales reforzados con fibras es importante en la fase del primer post fisuramiento, en especial las microfibras, obteniendo incremento en el valor pico. Como se observa en la siguiente figura

Figura 5. Curva de carga (P) – desplazamiento (σ) para concreto reforzado (a) bajo contenido de fibras, (b) alto contenido de fibras



Fuente. Mesa Giraldo, J. 2017

1.3.6 Rehabilitación / procedimientos de refuerzo

Cuando la carga aplicada sobre un elemento o en este caso un muro excede su resistencia, es necesario aplicar un refuerzo para mejorar el rendimiento de este. Para el caso de los edificios con mampostería no reforzada se recomienda usar los siguientes enfoques:

- a. Corregir las falencias de la estructura mediante las siguientes medidas:
 - Mejorar la transferencia de cortante entre los muros y el suelo/techo por medio de refuerzos
 - Disminuir la excentricidad entre el centro de masa y el de rigidez del muro para reducir el efecto de torsión, ya sea quitando o adicionando muros
 - Garantizar la continuidad de los muros verticalmente y su redundancia
- b. Corregir las falencias en las propiedades mecánicas de resistencia y deformación en los muros de flexión y muros a cortante por medio de lo siguiente:
 - Aumentar la resistencia, ya sea reforzando el muro o disminuyendo las cargas a cortante con el objetivo de reducir la rigidez de la pared cortando un muro más bajo en varias piezas con relación de dimensiones elevada
 - Mejorar la estabilidad en planta en caso que el muro se pretenda para que resista cargas laterales mediante un trasvase (ejemplo, añadiendo miembros)
 - Evitar que se derrumbe por fuera del plano, ya sea sujetando el muro a los diafragmas del suelo/techo o asignando restricciones en los bordes
- c. Reparar las falencias de la respuesta en elementos que no hagan parte de la estructura como, por ejemplo, paredes sin carga. Esto se puede alcanzar realizando un adecuado



anclaje, apoyo, refuerzo y en ciertos casos, garantizando las adecuadas juntas de movimiento para evitar que se transfiera carga hacia estos elementos

1.3.7 Consideraciones para la restauración de patrimonios históricos: Principios teóricos.

Los bienes patrimoniales y culturales que actualmente se encuentran en constante uso son los que están más propensos a sufrir cambios o en algunos casos, a ser destruidos. Para intervenir de manera adecuada un monumento histórico se necesita de manera imprescindible de un proyecto ejecutivo, en el que se determine el grado de intervención para cada caso y se registren los tipos de intervención que serán realizados en el inmueble (Terán, 2004)

- El **respeto a la evolución histórica** del bien inmueble hace referencia a que deben ser respetadas las diferentes etapas históricas constructivas de la edificación, sus espacios originales, incluyendo las remodelaciones y ampliaciones importantes que hayan sido realizadas, mismas que no representen una afectación y detrimento del inmueble
- El principio de **no falsificación** es aplicable cuando dentro de un proceso de restauración se necesita integrar (completar algún elemento o reproducir algunas formas perdidas del elemento arquitectónico). Si se presenta el caso en que por algún motivo, la conservación del edificio necesita de la sustitución o integración de una parte, forma o cierto elemento arquitectónico, así como de usar materiales tradicionales semejantes a los que hacen parte del inmueble, esta intervención debe ser fácil de reconocer, pero también debe alcanzar una integración visual con la edificación, es decir, no debe llamar la atención ni resaltar en la edificación.
- El principio de **Conservación in situ** hace referencia al hecho de no desconectar al edificio ni sus partes originales del lugar donde pertenecen u origen. Si por alguna razón, por ejemplo, en el caso de un sismo, algún elemento se desprende de su lugar original, este se debe integrar a su sitio original.
- Finalmente, el principio de **reversibilidad** hace referencia a seleccionar “aquellas técnicas, materiales e instrumentos que permitan anular fácilmente los efectos generados en el edificio, para recuperar el estado de este mismo justo antes de haber realizado la intervención, dado el caso que con una nueva interpretación o aporte, enfoques y criterios, la intervención realizada se declara inútil, inadecuada o perjudicial para el monumento

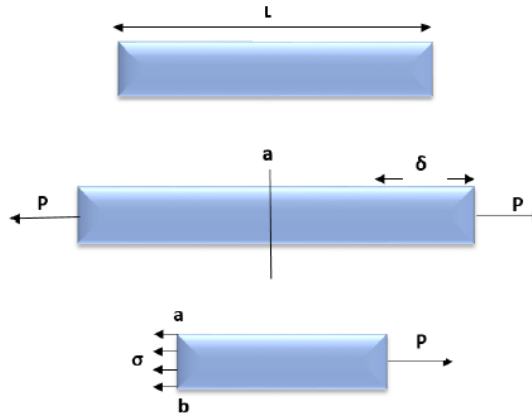
2.3.8 Esfuerzo normal y deformación unitaria.

Si se considera una barra prismática, con sección transversal constante en toda su longitud, cargada con fuerza axial P en los extremos (Imagen 9) la barra presenta un cambio en su



longitud o deformación. En este ejemplo, las fuerzas axiales producen un alargamiento uniforme de la barra.

Figura 6. Barra sujeta a tensión



Fuente. Adaptada (Timoshenko & Gere, 1986)

Efectuando el corte imaginario (*ab*), la carga (*P*) actúa sobre el extremo derecho del cuerpo libre; en el otro extremo ocurren fuerzas que representan la acción de la parte izquierda de la barra sobre la sección transversal. La intensidad de la fuerza (esto es, la fuerza por unidad de área) se denomina esfuerzo y se denota por la letra griega “ σ ”. Si se supone que el esfuerzo tiene una distribución uniforme sobre la sección transversal, se aprecia fácilmente que su resultante es igual a la intensidad (σ) multiplicada por el área transversal (*A*) de la barra. Por lo tanto, siendo consecuentes con el equilibrio de fuerzas, esta resultante debe ser de igual magnitud y de dirección opuesta a la carga aplicada (*P*). De lo anterior se obtiene la ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Cuando la barra se tensa por el actuar de las fuerzas *P*, como lo muestra la figura, los esfuerzos resultantes se denominan esfuerzos de tensión; si el sentido de las fuerzas se invierte, ocasiona que la barra se deforme acortando su tamaño y originando esfuerzos de compresión.

La variación total en longitud que sufre un elemento al aplicársele una carga se denota “ δ ”. En el caso de la barra, el alargamiento constituye el resultado acumulativo del estiramiento del material sobre la longitud (*L*) de la barra. Con base a esto, el concepto de alargamiento por unidad de longitud, o deformación unitaria, denotada por la letra griega “ ϵ ”, se determina por la ecuación:

$$\epsilon = \frac{\delta L}{L} \quad (2)$$



1.3.9 Ensayos Destructivos

1.3.9.1 Determinación de la Resistencia a la Compresión

Teniendo en cuenta la NSR-10, el valor especificado para la resistencia a la compresión en la mampostería ($F'm$) debe ser determinado con base en alguno de los siguientes procedimientos

- a) Usando registros históricos
- b) Determinándola experimentalmente sobre muretes de prueba
- c) Realizando ensayos de forma individual a los materiales

Por medio de registros históricos: Cuando se cuente con registros confiables y suficientes de los resultados en pruebas realizadas a distintas muestras de muretes de construcciones anteriores, hechas con los materiales especificados para la obra, y que se hayan desarrollado con similitud en los procesos técnicos y de supervisión, en caso tal que el coeficiente de variación de los resultados obtenidos sea menor o igual al 30%, se permite utilizar el valor de $F'm$ con base en estos registros históricos, dependiendo del número de ensayos registrados.

Por determinación experimental sobre muretes de prueba: El valor de $F'm$, para una muestra determinada debe ser la media del ensayo realizado en mínimo 3 muretes de igual procedencia, pero no puede ser mayor que el 125% del menor valor encontrado en los ensayos. El valor de resistencia en cada uno de los ensayos se obtiene dividiendo la carga última obtenida con el área neta de la mampostería con que cuenta el murete al momento de realizar el ensayo.

Este ensayo está regulado a nivel nacional por la Norma Técnica Colombiana NTC-3495; Normativa que contiene las especificaciones para la elaboración y ensayos de muros de mampostería que ayuden a determinar la resistencia a la compresión de estos mismos, valor que debe utilizarse para determinar si cumplen con el requisito de resistencia nominal a la compresión de la mampostería ya especificada ($F'm$).

La relación altura-ancho mínima que deben tener los muretes es de 1.5 o mayor a esta y el límite superior de esta relación es de 5. Los muros de mampostería de bloque de perforación vertical deben contar como mínimo con el largo de una pieza completa. Los muretes de otros tipos se deben construir con mínimo 10 cm de largo. El tipo de construcción debe representar el tipo de mampostería a utilizar en la construcción.

Se calcula la relación a_m/e_m para cada murete, utilizando la altura y la menor de las dimensiones transversales (espesor) del murete. Debe determinarse el factor de corrección, este se encuentra expuesto en la Tabla 1. Si la relación entre altura y espesor del murete de mampostería no está entre los valores de a_m/e_m de la tabla 1. El factor de corrección correspondiente debe ser calculado mediante la interpolación lineal entre los valores ya dados.



El valor de resistencia debe corregirse por esbeltez de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 1. Factor de corrección por esbeltez para f'_m

Relación altura / espesor del murete	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15	1.22

Fuente. NSR - 10

Se describe el modo de falla, tan precisamente como sea posible, se ilustra (mediante un dibujo, una fotografía, o ambos), se indican los patrones de fisuración y de desportillamiento. Se anota si la falla ocurrió en un extremo del murete antes de la falla del lado o extremo opuesto del mismo.

Ensayo sobre materiales individuales: La resistencia especificada a la compresión de la mampostería f'_m , se puede determinar experimentalmente para los mismos materiales que se van a emplear.

1.3.10 Ensayos no destructivos

El método de ultrasonido o velocidad de propagación de ondas sónicas en el concreto, consiste básicamente en medir el tiempo que necesita una onda de este tipo en recorrer la distancia comprendida entre dos transductores, uno emisor y otro receptor de la onda, acoplados al concreto u otro material que se esté ensayando. Al material se le determinan sus características mecánicas teniendo en cuenta dos variables esenciales:

- El tiempo de recorrido
- La potencia con que se recibe el impulso

Teniendo en cuenta la pérdida que se genera en la potencia con respecto a la del impulso emitido en un principio.

Al aplicar esta técnica para estudiar el concreto, se produce un impulso de vibraciones ultrasónicas por medio de un transductor electro-acústico y que está en contacto previo con la superficie del hormigón ensayado. Luego de haber recorrido una distancia determinada "L" en la matriz del concreto, el impulso se convierte en una señal eléctrica por medio de un segundo transductor, que también ha estado en contacto previo con la superficie del concreto ensayado. Con la ayuda de este circuito electro-sónico se puede determinar el tiempo de tránsito "t" que ha utilizado el impulso para poder atravesar la distancia "L". Para determinar la velocidad de los ultrasonidos se tiene la siguiente ecuación:

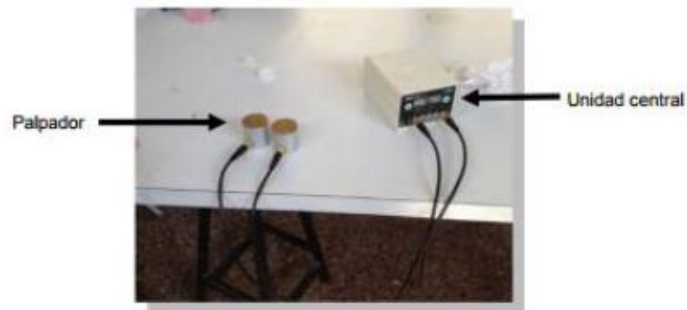
$$V = \frac{L}{t}$$



En este caso, las frecuencias que se usan son cercanas a las de la zona audible y se pueden alcanzar una frecuencia de hasta 250 KHz siendo la más apropiada de 50 KHz para ensayar el concreto. Esto se debe, como se mencionó anteriormente, a que para poder hacer una medición con exactitud en cuanto al tiempo de recorrido se necesita de un flanco de impulso lo más vertical que se pueda, es decir, de altas frecuencias. Por otro lado, solo se consiguen grandes penetraciones en materiales no homogéneos (como el caso del concreto) con frecuencias bajas (para que haya poca amortiguación de la señal), por lo que es necesario utilizar frecuencias alrededor de 50 KHz.

Para realizar este ensayo, se debe usar con antelación un material conocido para calibrar el equipo. Normalmente es una pieza cristalina con una resistencia conocida.

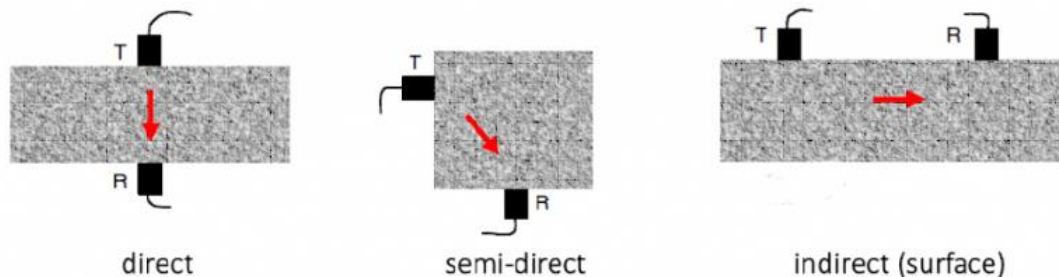
Figura 6. Equipo de ultrasonido



Fuente. Tomado de Llopis, 2013

En la figura 7 se muestran las opciones para instalar los transductores en la superficie de prueba de la probeta. La transmisión puede ser directa, semi-directa o indirecta.

Figura 7. Opciones de instalación de transductores



Fuente. Tomado de internet

Mientras sea posible deberá utilizarse la transmisión directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida. Sin embargo, algunas veces tiene que examinarse el hormigón mediante el uso de trayectorias diagonales. La transmisión indirecta es la menos satisfactoria, ya que además de su relativa insensibilidad, nos da medidas de la velocidad de pulso que usualmente tienen la influencia de la capa de hormigón cercana a la superficie, que no serán representativas del hormigón en estratos más profundos.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad de la utilización de un revestimiento de mortero a base de cal reforzado con fibras de polipropileno, por medio de ensayos no destructivos y de compresión simple a muretes fabricados en laboratorio como una alternativa para la restauración de muros de mampostería colonial tipo I en la ciudad de Cartagena.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de resistencia a la compresión sobre muestras de mortero a base de Cal reforzado con diferentes dosificaciones de fibras de polipropileno previamente definidas
- Escoger la dosificación óptima de fibras para el mortero y estudiar las propiedades mecánicas de los muretes de mampostería colonial cuando son revestidos con dicho pañete, específicamente la resistencia a la compresión y la deformabilidad
- Aplicar esta técnica como una alternativa de reforzamiento para la restauración y conservación de las construcciones coloniales de la ciudad de Cartagena.

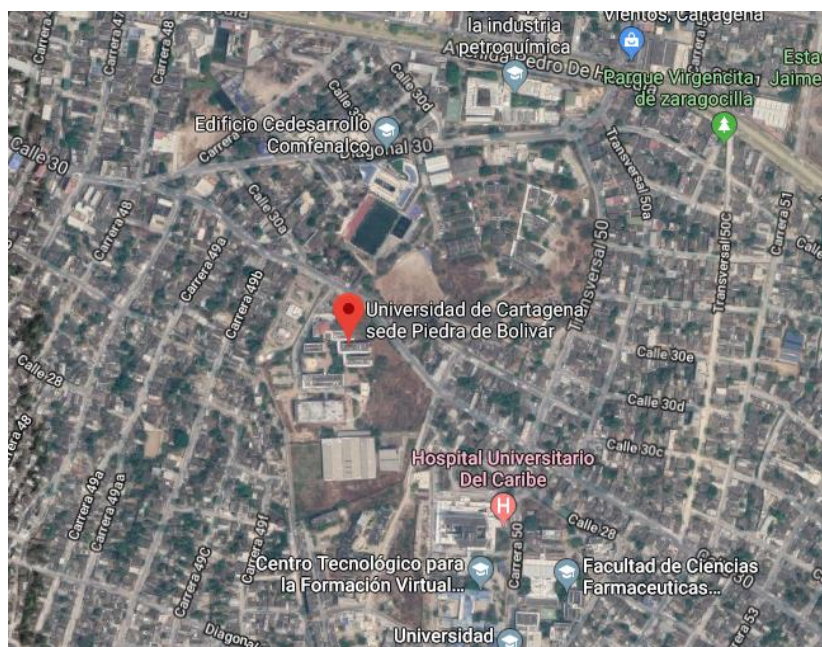


3. ALCANCE

En esta investigación evaluó la utilización de morteros a base de cal y reforzados con fibra, en muretes de mampostería colonial tipo I; todos los ensayos se realizaron sobre muretes fabricados con materiales similares a los utilizados en la antigüedad, materiales que actualmente se usan en procesos de restauración de edificaciones coloniales.

El espacio donde se desarrolló la investigación fue la ciudad de Cartagena, los ensayos para determinar las propiedades de los materiales y agregados se realizaron en los laboratorios de la Universidad de Cartagena (figura 8), para el caso de los ensayos destructivos, estos se llevaron a cabo en el laboratorio GEOCONSULTAS LTDA y los ensayos de ultrasonido no necesitaron de un lugar en especial, se desarrollaron en el mismo espacio donde se construyeron dichos muretes en el barrio Crespo de la ciudad de Cartagena (figura 9).

Figura 8. Universidad de Cartagena, sede Piedra Bolívar



Fuente. Tomado de Google Maps

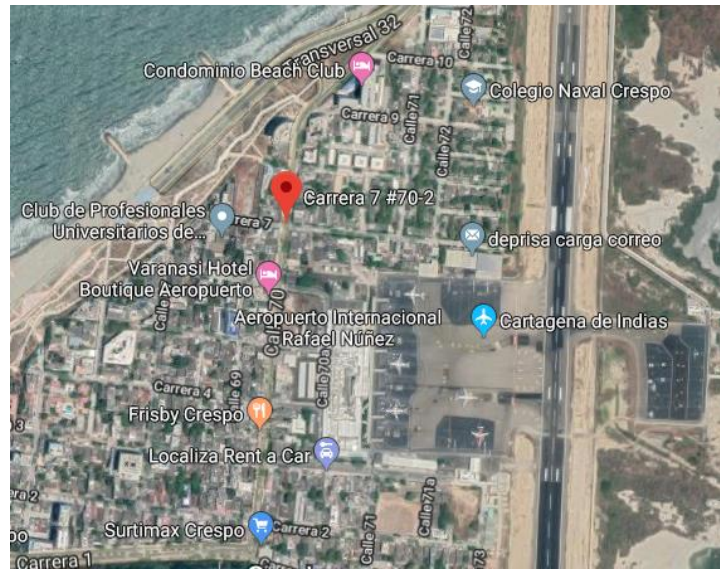


Figura 9. Vivienda donde se construirán los muretes

Fuente. Tomado de Google Maps

Una limitación que es importante mencionar en el presente estudio es el tipo de fibra seleccionado para el análisis de resultados, aunque existen diferentes tipos de fibras (como las microfibras y macrofibras), así como diferentes concentraciones en las que éstas pueden utilizarse en un mortero, en esta investigación se utilizaron inicialmente microfibras de polipropileno y la concentración se determinó con ensayos de resistencia del mortero. Tomando como referencia la concentración óptima de fibra que se evidenció en un estudio previo a nivel internacional donde usaron fibras de polipropileno en morteros a base de cal y también la dosificación recomendada por el fabricante de las fibras a nivel local.

A pesar de lo anterior, finalmente se usó como parte del estudio un mortero especial de restauración que contiene fibras de vidrio dentro de sus componentes, con este material se revistieron los muretes de mampostería debido a diversos inconvenientes que se presentaron con el mortero a base de Cal con adición de fibras de polipropileno.

El desarrollo de este estudio se realizó en el segundo período académico del año 2019, aunque aún no ha finalizado ya se tiene un 90% de la investigación realizada; cabe aclarar que de las propiedades mecánicas de los muretes sólo se tuvo en cuenta el comportamiento de la resistencia a la compresión (f'_m), su deformabilidad y módulo de elasticidad (E). Las demás propiedades mecánicas no se tuvieron en cuenta en la presente investigación.

Con esta investigación se buscó proponer una alternativa de reforzamiento para los muros de mampostería colonial tipo I, especialmente aquellos que necesiten ser sometidos a procesos de restauración en la ciudad de Cartagena. Así mismo, se quiso brindar a los profesionales restauradores valores aproximados de las propiedades mecánicas que se pueden alcanzar al



intervenir muros de mampostería con esta técnica, específicamente la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad que pueden alcanzarse en dichos muros.

Los resultados de esta investigación también pueden servir como una base para futuras investigaciones que vayan enfocadas en la obtención de morteros a base de cal con alto desempeño mecánico, morteros reforzados con fibras y adiciones químicas que puedan usarse para restaurar edificaciones y monumentos históricos de la ciudad de Cartagena. Así mismo, con los resultados de esta investigación y otras que están en desarrollo se podrían definir lineamientos para la restauración de estructuras coloniales desde el aspecto estructural, teniendo en cuenta que estas construcciones no son cobijadas por la norma colombiana de sismo-resistencia.

Con esta investigación no se restauró ninguna edificación de la ciudad de Cartagena, esta se limitó a evaluar si el uso de materiales y técnicas de reforzamiento expuestos anteriormente se pueden considerar como una alternativa factible para restaurar muros de mampostería colonial.



4. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo mixta puesto que, en ella se aplicaron dos enfoques distintos, uno teórico en la fase inicial y luego una fase experimental. En la siguiente figura se puede observar una esquematización de las diferentes fases que componen el presente estudio.

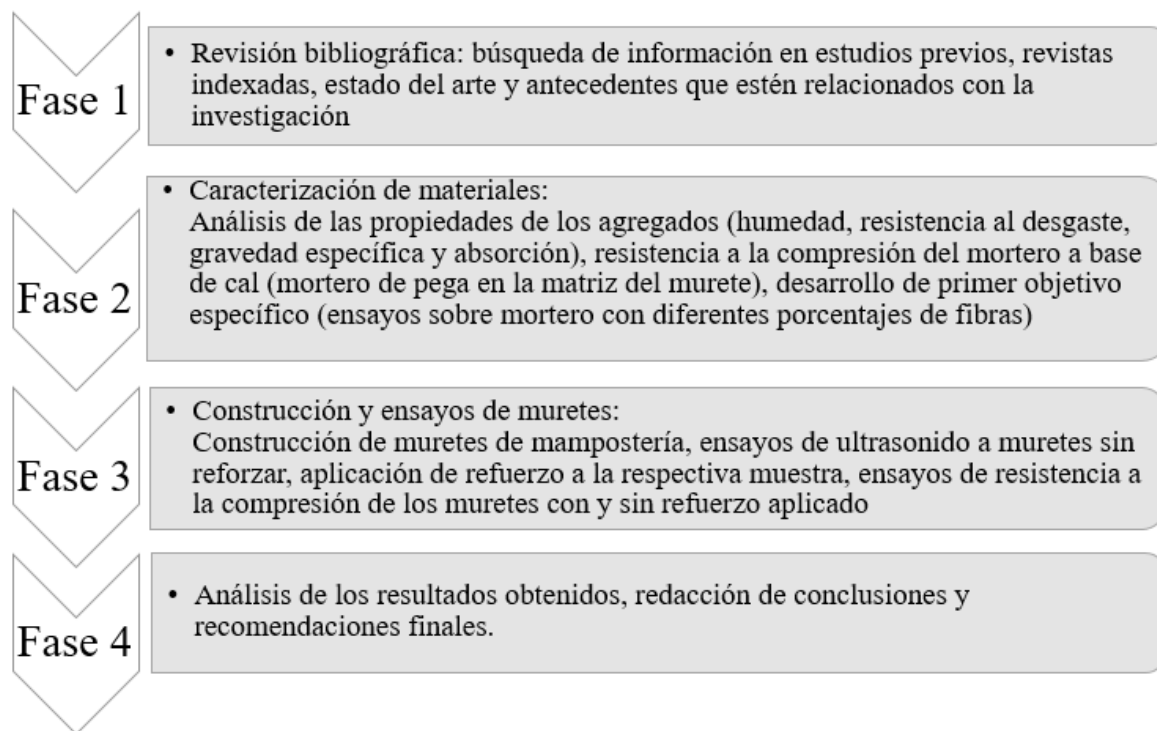


figura 10. Resumen de la metodología para el desarrollo de la presente investigación

Fuente. Autor

La primera fase correspondió a una revisión bibliográfica donde se buscó analizar en diferentes estudios, la utilización de morteros a base de cal reforzado con fibras para aumentar las características mecánicas de este, así como las metodologías de reforzamiento y materiales utilizados en las edificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena. Para el caso de los materiales a usar en la construcción de muretes de mampostería colonial, actualmente existen investigaciones realizadas con anterioridad, donde ya se encuentran definidos los materiales actuales que se asemejan a los usados en la época de la colonia y también las dosificaciones que deben manejarse de cada material para construir dichos muros. Una vez que se determinó el tipo o los tipos de fibra que mejor comportamiento desarrollan al trabajar en conjunto con los morteros a base de Cal se procedió a desarrollar la segunda fase que es de tipo experimental, es decir, la construcción de muretes de mampostería colonial con materiales actuales, el revestimiento de estos mismos con mortero a base de Cal reforzado,



la realización de ensayos destructivos a los muros para evaluar sus características mecánicas, el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos y por último las conclusiones a las que se lleguen. La descripción detallada de cada uno de los pasos a desarrollar en estas dos fases se presenta a continuación.

6.1 Revisión bibliográfica

En esta fase se procedió a buscar información de diferentes fuentes bibliográficas, como las bases de datos científicas a las que se encuentra suscrita la Universidad de Cartagena, diferentes estudios o informes científicos en internet, trabajos de investigación realizados con anterioridad a nivel local, libros y revistas científicas indexadas. La información a analizar fue acerca del uso fibras para reforzar morteros a base de cal, las diferentes técnicas de restauración que hayan sido utilizadas en las edificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena, así como los materiales que ya han sido estudiados en los muros de mampostería colonial y que hayan dado buenos resultados en cuanto al comportamiento de las propiedades mecánicas de estos.

Una vez que se estudiaron las diferentes fuentes de información se contó con claridad acerca de los materiales a utilizar en la fase experimental de esta investigación, específicamente se identificaron las fibras de refuerzo que mejor comportamiento mecánico podrían desarrollar en los muros de mampostería colonial al momento de revestir dichos muros con un mortero a base de Cal reforzado con estas fibras. Así mismo, se tuvo mayor claridad en cuanto a los materiales actuales que se utilizaron para construir los muretes de mampostería colonial que se ensayaron, es decir, las fuentes de materiales adecuadas, la dosificación de agregados que mejores resultados ha presentado, la relación óptima de cal:arena para la argamasa, el porcentaje ideal de fibras a utilizar en el mortero, entre otros.

6.2 Adquisición de materiales

Luego de realizar un análisis previo, donde se estudiaron las diferentes fuentes de materiales y se determinaron cuáles son las que mejores resultados presentan, se seleccionaron las canteras en las cercanías de Cartagena para extraer la piedra caliza y piedra coralina, los distribuidores comerciales donde se adquirió el ladrillo (también conocido como tableta militar), la marca de Cal y el tipo de arena a utilizar.

Para el caso del material calizo, la cantera “Coloncito” ubicada en el municipio de Turbaco y que actualmente es una de las fuentes donde extraen material para los procesos de restauración de edificaciones coloniales, es la cantera que proporciona la roca con mejores propiedades mecánicas y físicas para efectos de restauración. (Rhenals Acuña & Santos de



Avila, 2012). Así mismo, la piedra coralina a utilizar será extraída de una cantera que se encuentra ubicada en el corregimiento de la boquilla a las afueras de la ciudad.

En cuanto al ladrillo militar que se usó, se evidenció que no presentaban diferencias apreciables entre los diferentes distribuidores de la ciudad de Cartagena, por lo tanto, con cualquier tipo de ladrillo se puede realizar el proceso de construcción de muretes. En el caso de la arena que se usó en la argamasa, se encontró que el tipo material más adecuado para realizar estas obras era la arena natural lavada de río.

Teniendo en cuenta la investigación “*Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena*” (Aguirre Castellar & Arrieta Torres, 2014), se encontró que la Cal que presenta mejores resultados en cuanto a ensayos de resistencia a la compresión cuando se utiliza para crear argamasa en las construcciones antiguas, es la denominada “Cal Nare”, material que es semi-hidratado y necesita un procedimiento de apagado, con un mínimo de 8 horas antes de usarse. Adicionalmente, la proporción óptima de Cal:arena que se encontró para la fabricación de mortero a base de Cal (argamasa) es la mezcla 1:2 respectivamente. (Herrera A.)

Finalmente, para la adición de fibras, se encontró que utilizar cualquier tipo de fibras aumentaba la capacidad de deformación del mortero a base de Cal. Las fibras que mayores casos de estudio presentaron y en general con resultados positivos en todas las ocasiones, fueron las fibras de vidrio y de polipropileno.

A nivel nacional se encontró que en la empresa Sika se comercializan fibras de polipropileno de 19 mm que representaron una muy buena alternativa para reforzar el mortero a base de Cal. Para la realización de esta investigación se utilizaron estas fibras, denominadas comercialmente como SikaFiber® AD, producto que viene en presentaciones de 1 Kg cada bolsa y que tiene un rendimiento de 1 m³ por cada 0,6 kilogramos de fibra adicionado a un mortero o concreto, esta dosificación fue transformada a porcentaje teniendo en cuenta el peso del material cementante, por lo que fue necesario calcular la densidad aparente de la Cal y la cantidad necesaria de este mismo para producir 1 m³ de mortero, como resultado se obtuvo que la concentración de 0,6 Kg de fibra por cada m³ de mortero equivale a obtener un 0.2% de fibra con respecto al peso del material cementante, en esta caso la cal. Aunque en la fase final de la investigación se optó por usar un mortero de restauración especial que ya cuenta con adición de fibra de vidrio, dicho mortero llamado Planitop es suministrado por la empresa italiana MAPEI y su uso es exclusivo para obras de restauración.

6.4 Ensayos realizados a los materiales

Para realizar los ensayos necesarios en cada uno de los diferentes agregados fue necesario realizar un triturado previo puesto que estas muestras fueron proporcionadas en tamaños muy



grandes para su adecuado manejo. Una vez que se tuvo el material triturado se pudo determinar cada una de sus propiedades físicas.

Ensayos de contenido de humedad (INV E-122-07)

El contenido de humedad en una muestra de material se define como la relación que existe entre la masa de agua que llena los poros de forma natural en una masa de material y la masa de las partículas sólidas de este mismo material, esta relación se expresa como porcentaje y la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$w = \left| \frac{P_{hum} - P_{sólido}}{P_{sólido}} \right| * 100$$

Donde, el $P_{sólido}$ del material se puede calcular como el peso seco de la muestra menos el peso del recipiente o “tara” utilizado.

Para tener un resultado más representativo se utilizaron 3 muestras de material diferentes y se calculó el porcentaje de humedad promedio para cada tipo de agregado (piedra caliza, pómez y ladrillo).



Figura 11. Muestra de ladrillo

Fuente. Autor



Figura 12. Muestra de caliza

Fuente. Autor



Figura 13. Muestra de pómez

Fuente. Autor



Figura 14. Peso seco de muestra

Fuente. Autor



Figura 15. Peso de recipiente

Fuente. Autor



Figura 16. Secado de muestras en el horno

Fuente. Autor

Ensayo de resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles (INV E 219-07).

Este ensayo fue realizado sobre las muestras de piedra caliza y piedra pómez, para el ladrillo militar no fue necesario realizar este ensayo puesto que en este tipo de material no aplica. Por lo tanto, solo fue necesario obtener la granulometría especificada por la norma para las muestras de piedra caliza y piedra pómez. Dicha granulometría y especificaciones de peso para las muestras se encuentra especificada en la norma, así como se indica en la siguiente tabla.

Tamaño del tamiz				Masa de la muestra para ensayo (g)		
Pasa		Retiene		Granulometrías		
mm	(alt.)	mm	(alt.)	E	F	G
75 mm	(3")	63 mm	(2½")	2500 ± 50
63 mm	(2½")	50 mm	(2")	2500 ± 50
50 mm	(2")	37.5 mm	(1½")	5000 ± 50	5000 ± 50	...
37.5 mm	(1½")	25 mm	(1")	...	5000 ± 25	5000 ± 25
25 mm	(1")	19 mm	(¾")	5000 ± 25
TOTALES				10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50

Figura 17. Granulometrías normalizadas

Fuente. INV 219-07

Luego de haber sometido las muestras a las revoluciones y al número de esferas que indica la norma se procedió a extraer cada una de las muestras y tamizarlas por el tamiz #12, una



vez tamizadas dichas muestras, se lavaron para eliminar cualquier resto de partículas finas, luego fueron ingresadas en el horno durante 24 horas para secarlas completamente y así encontrar su peso seco final. Finalmente, el % de desgaste que presentaba cada muestra era la relación entre el peso inicial (P1) y el peso seco que pasa por el tamiz #12 (P2).

$$D (\%) = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$



Figura 18. Muestra de pómez al salir de la máquina

Fuente. Autor



Figura 19. Muestra de pómez pasada por tamiz #12

Fuente. Autor



Figura 20. Muestra pómez, ensayo resistencia al desgaste

Fuente. Autor



Figura 21. Muestra caliza lavada, luego de pasar por la máquina de los ángeles

Fuente. Autor



Figura 22. Muestra caliza, previa al ensayo de desgaste

Fuente. Autor



Figura 23. Muestra caliza lavada luego del ensayo de desgaste.

Fuente. Autor

Ensayo de gravedad específica y absorción (INV E-223-07)

Para realizar este ensayo fue necesario sumergir las muestras de materiales durante 24 horas para garantizar su estado de saturación, una vez que transcurrió este tiempo y se tuvo la muestra saturada se procedió a tomar la medición de su peso, en primer lugar, se utilizó un wiper o paño para secar superficialmente la roca saturada y se tomó su peso saturado superficialmente seco (P.S.S.S.).



Figura 24. Muestras de pómez y ladrillo sumergidas

Fuente. Autor

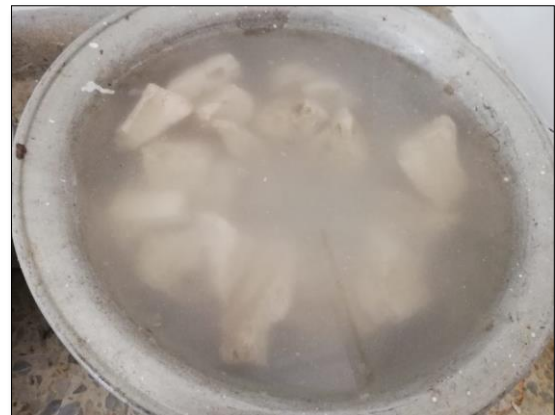


Figura 25. Muestra caliza sumergida

Fuente. Autor



Figura 26. Peso Saturado superficialmente seco de caliza

Fuente. Autor



Figura 27. Peso saturado superficialmente seco de pómez.

Fuente. Autor



Figura 28. Peso saturado superficialmente seco del ladrillo

Fuente. Autor



Luego de esto se procedió sumergir cada una de las muestras en una alberca parcialmente llena de agua y con la ayuda de una canasta de uso especial para dicho ensayo se procedió a tomar lectura del peso sumergido de cada uno de los materiales.



Figura 29. Peso sumergido piedra pómez

Fuente. Autor



Figura 30. Peso sumergido piedra caliza

Fuente. Autor

Finalmente se procedió a secar cada una de las muestras durante 24 horas dentro del horno para eliminar cualquier partícula de agua que estuviera depositada dentro de los poros del agregado.



Figura 31. Peso seco del ladrillo

Fuente. Autor

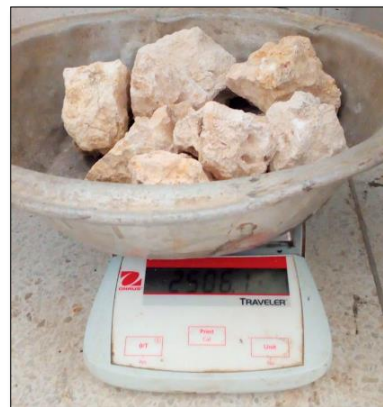


Figura 32. Peso seco de la caliza

Fuente. Autor



Ensayo de resistencia a la compresión del mortero (INV 323-07)

Estos ensayos se realizaron sobre muestras de mortero a base de Cal para determinar su resistencia, las proporciones que se usaron para estas mezclas de mortero fueron de 1 de cal por 2 de arena, la cantidad de agua utilizada fue la sugerida por la norma, en este caso fue de 48,5% del peso del material cementante (en este caso Cal). Se siguió cada una de las recomendaciones para la preparación de las muestras y finalmente se sometieron a ensayos de resistencia con una máquina de compresión simple. Esto para analizar la resistencia del mortero de pega con que se construyeron los muretes de esta investigación.



Figura 33. Ensayo de resistencia a la compresión del mortero a base de cal (cal:arena)

Fuente. Autor

Adicional al ensayo de resistencia a la compresión del mortero a base de cal, se realizó esta misma prueba, pero sobre morteros con adición de fibras al 0.06%, 0.13% y 0.20% respectivamente, con este ensayo se buscó estudiar el mortero de revestimiento aplicado sobre los muretes. Sin embargo, para acelerar el proceso de fraguado de las muestras de mortero a base de cal reforzadas, se procedió a remplazar un 30% de la cal por cemento. Es importante mencionar que, aunque se haya adicionado cemento para no retrasar la investigación, se dejaron como testigos 3 cubos de mortero a base 100% de cal y arena reforzado con los mismos porcentajes de fibras mencionados anteriormente, con esto se verificó que el porcentaje de fibra óptimo hallado con el mortero a base de cal y cemento era el mismo porcentaje óptimo al usar un mortero a base 100% de cal. En esta parte de la investigación fue necesario utilizar una balanza analítica con una precisión de 3 cifras significativas puesto que los pesos equivalentes a los porcentajes de fibras eran muy pequeños, por ejemplo, para cubos de mortero donde se usen entre 400 g de cal, el peso equivalente en fibras con una concentración de 0.06% sería de 0.24 g, magnitud que es imposible de obtener con una balanza común y corriente.



Figura 34. Materiales usados para fabricar cubos de mortero (cal, cemento, arena)

Fuente. Autor



Figura 35. Mezcla de mortero sin agregarle agua

Fuente. Autor

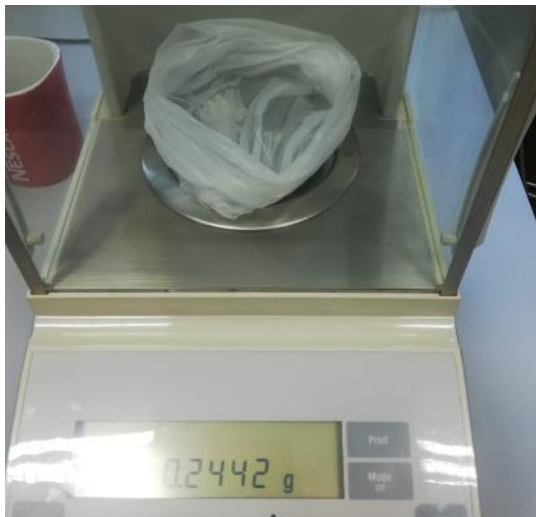


Figura 36. Peso en fibra correspondiente a un 0.06% del peso en Cal

Fuente. Autor



Figura 37. Adición de fibra a la muestra de mortero

Fuente. Autor

Luego de haber mezclado uniformemente las cantidades de cal, cemento, arena y fibra se procedió a adicionar el agua a la mezcla, como se mencionó anteriormente se utilizó una relación agua/material cementante de 48,5% por la recomendación de la norma INV 323, pero para efectos de alcanzar una consistencia adecuada fue necesario aplicar un 10% adicional de agua, antes de realizar este paso la mezcla que se obtuvo era demasiado seca y



su manejabilidad se dificultaba. Finalmente, con la cantidad de agua adicionada se procedió a depositar las muestras de mortero en el molde correspondiente a las briquetas.



Figura 38. Cubos de mortero a base de cal sin reforzar

Fuente. Autor.



Figura 39. Ensayo de compresión simple sobre cubos de mortero

Fuente. Autor

Este mismo procedimiento se realizó para obtener muestras de mortero reforzado con los 3 porcentajes de fibras estudiados (0.06%, 0.13% y 0.2%), luego de 7 días de fraguado se procedió a ensayar cada una de las muestras para determinar cuál era la que mayor resistencia mecánica desarrollaba.



Figura 40. Cubo de mortero durante ensayo de compresión simple, adición de 0.13% de fibra.

Fuente. Autor



Figura 41. Resistencia a la compresión del cubo de mortero

Fuente. Autor



En el resultado anterior es necesario corregir la lectura, debido a que en la máquina de compresión se impuso una carga antes de montar el cubo, esta carga debe ser restada de la lectura. En este caso se deben restar 1.4 KN a los 3.5 KN que leyó el sensor de la máquina. Es decir, el cubo resistió en total una carga de 2.1 KN.



Figura 42. Cubo de mortero con adición de 0.24% de fibra durante prueba de compresión simple

Fuente. Autor



Figura 43. Resistencia alcanzada por la muestra

Fuente. Autor



Figura 44. Cubo de mortero con adición de 0.06% de fibra durante prueba de compresión simple

Fuente. Autor

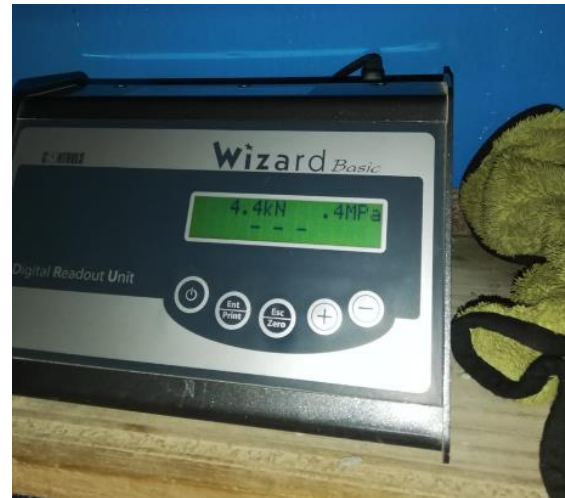


Figura 45. Resistencia alcanzada por la muestra

Fuente. Autor



Dentro de los resultados anteriores se pudo observar que la dosificación de fibra de polipropileno que le permitió a las muestras de mortero desarrollar una mayor resistencia mecánica fue la de 0.06%, concentración para la que se alcanzó un máximo de 3 KN de resistencia a la compresión. Para la concentración de 0.13% se obtuvo una resistencia promedio de 2.1 KN y para la concentración de 0.20% la resistencia promedio alcanzada por el mortero fue de 1.0 KN. Con estos resultados se pudo observar que la dosificación óptima de fibras era de 0.06%. Con el resultado anterior se determinó que para revestir los muretes con el mortero a base de Cal reforzado con fibras de polipropileno debía usarse una concentración de 0.06%.

En el transcurso de la investigación se tomó la decisión de utilizar otro tipo de cal para el mortero de revestimiento, los motivos de este cambio se mostrarán más adelante cuando se analice el proceso de revestimiento de los muretes con mortero a base de cal reforzado con fibras. Por el momento es importante mencionar que a este nuevo mortero de revestimiento a base de cal apagada sin reforzar también se le realizó el ensayo de resistencia a la compresión, todo esto con el objetivo de comparar la resistencia desarrollada por dicho mortero con la alcanzada por el mortero constituido a base de cal hidratada sin reforzar. Aunque a este mortero de cal apagada se le adicionó fibra, no se hizo ensayo de resistencia de este mismo para diferentes porcentajes de fibra, solo se asumió el porcentaje de 0.06% como el óptimo, en su lugar solo se comparó la resistencia de los cubos de mortero sin reforzar entre cal hidratada y cal apagada. En la siguiente figura se puede observar el desarrollo del ensayo sobre este nuevo material.



Figura 46. Ensayo de resistencia a la compresión del mortero a base de cal apagada sin reforzar

Fuente. Autor



Durante el proceso de mezclado del mortero se evidenció una característica particular de mencionar con respecto a la dosificación volumétrica utilizada (cal:arena), cuando se construyeron los cubos con la Cal hidratada (material que viene en polvo), se pudo obtener fácilmente la relación volumétrica 1:2 correspondiente a Cal y arena, pero para el caso de la cal apagada que se encuentra saturada y permanentemente sumergida hay que tener en cuenta el efecto que tiene la presencia de agua en la relación volumétrica, la diferencia reside en que la Cal hidratada viene en polvo y la cal apagada es una pasta. Por esta razón, para adquirir una adecuada manejabilidad del mortero fue necesario utilizar una relación volumétrica 1:1 correspondiente a pasta de cal apagada: arena respectivamente. Se hace la salvedad de mencionar que para obtener esta dosificación se tomaron 2 muestras con un determinado volumen inicial de Cal apagada, se dejaron secar en el horno durante un día (como se realiza el ensayo de humedad) y se calculó el volumen de agua que perdieron las muestras al secarse, encontrándose que entre un 44% y 49% del volumen en la pasta de cal apagada corresponde al agua, con este dato se asumió que para igualar la relación 1:2 hecha con cal hidratada en polvo, se necesitaba aproximadamente el doble del volumen en pasta de cal apagada, es decir, una relación 1:1 aproximadamente. Esta puede no ser la dosificación óptima para trabajar el mortero a base de cal apagada, pero por ser un imprevisto dentro de la investigación se utilizó dicha dosificación.

6.4 Construcción de muretes de mampostería colonial

Para la fabricación de los muros se usaron las proporciones de agregados mencionadas con anticipación, estas corresponden a una proporción volumétrica de 1:2:4 compuesta por argamasa, piedra coralina + piedra pómez y trozos de ladrillo respectivamente. Los materiales se escogieron teniendo en cuenta las investigaciones anteriores realizadas en la zona y siguiendo las recomendaciones de distintos profesionales en el tema, esto para garantizar que los agregados con los que se realizaran los muretes tuvieran propiedades similares a los realizados en investigaciones anteriores que además han servido como base para desarrollar esta investigación.

Para fabricar el concreto colonial mixto o también conocido como cascoteo (componente de los muros de mampostería colonial tipo I) fue necesario fragmentar bloques de rocas calizas, coralinas y ladrillos para poder obtener una manejabilidad adecuada de los materiales y de la mezcla, aparte que para alcanzar una cierta regularidad en los muretes era necesario manejar tamaños pequeños en los agregados. Para la construcción de los muretes fue necesario utilizar una formaleta para obtener las medidas de los muretes 40x50x20 cm (ancho x alto x espesor), una vez que los agregados estaban mezclados adecuadamente junto con la argamasa preparada con anterioridad, la mezcla de concreto colonial fue dispuesta en las formaletas hasta así obtener 5 muretes.



Figura 47. Proceso de construcción de muretes de mampostería colonial

Fuente. Autor.

6.5 Ensayos no destructivos de ultrasonido sobre los muretes

Una vez que los muretes fueron construidos y se esperó el tiempo necesario para su fraguado, todos estos fueron sometidos a ensayos de ultrasonido, este procedimiento se realizó con el objetivo de encontrar una correlación o cierta tendencia entre las velocidades de pulso registradas en los muretes y las resistencias mecánicas que se obtendrían posteriormente en los ensayos de compresión simple. De esta manera se espera que en un futuro se tenga una base de datos lo suficientemente representativa donde con sólo realizar ensayos de ultrasonido en estructuras coloniales (como la contraescarpa del cordón amurallado) para conocer su resistencia mecánica y estimar el estado en que estas se encuentran. Este ensayo se llevó a cabo teniendo en cuenta los lineamientos de la norma NTC 4325.



Figura 48. Realización de ensayos de ultrasonido sobre los muretes

Fuente. Autor

6.6 Proceso de revestimiento de los muretes

Luego de realizar los ensayos de ultrasonido (tiempo prudente en el cual los muretes habían fraguado) se procedió a realizar el respectivo revestimiento con mortero a base de cal reforzado con fibras de polipropileno. Para llevar a cabo este procedimiento se procedió a mezclar los materiales necesarios para el mortero, en este caso la Cal, arena y la fibra previamente pesada. Fue necesario preparar la superficie de los muretes de tal forma que permitieran la adecuada adherencia del mortero, para ello fue necesario picarlos



superficialmente de manera que su rugosidad fuese mayor. Posteriormente se removieron todos los restos de polvo para que las caras de los muretes quedaran completamente limpias. Finalmente se procedió a mezclar y aplicar en cada uno de los muros el pañete de revestimiento.



Figura 49. Preparación del mortero de revestimiento y de los muretes a reforzar

Fuente. Autor

Infortunadamente se evidenció un problema al momento de aplicar el pañete de revestimiento, específicamente por la poca adherencia que desarrollaba el mortero con superficie del murete, tanto así que, al intentar aplicarlo con el palustre, este se corría hasta la parte baja del murete donde se creaba una especie de bulbo de mortero y en la parte superior del murete era imposible mantener la suficiente cantidad de pañete adherida. Ante esta situación se procedió a recostar los muretes contra el suelo (procedimiento que no debería realizarse porque no es acorde con las condiciones reales de los muros de mampostería



colonial que siempre estarán dispuestos de forma vertical). Luego de realizar este proceso se pudo aplicar los 2 centímetros correspondientes a la capa de mortero de revestimiento.



Figura 50. Revestimiento de los muretes con mortero a base de Cal reforzado con fibras de polipropileno

Fuente. Autor



Una vez que se terminaron de revestir los muretes por una de sus caras, se procedió a dejar que el pañete fraguara lo suficiente como para poder aplicar la capa de revestimiento en la cara opuesta. En el desarrollo de esta última actividad mencionada se presentaron inconvenientes muy importantes que impidieron continuar con el proceso de revestimiento. Debido a la poca adherencia que el mortero a base de Cal desarrollaba con los muretes, al momento de levantar los muros y poner su cara opuesta hacia arriba para revestirla, la capa de mortero aplicada con anterioridad se desprendía del murete. Esto sucedió en 3 de los muretes que se tenían revestidos y no pudo continuarse con la investigación puesto que las condiciones no permitían hacerlo.



Figura 51. Desprendimiento del mortero de revestimiento de los muretes

Fuente. Autor

Luego de esta evidente problemática se procedió a indagar sobre otras formas de aplicar el revestimiento, ya que el utilizar Cal hidratada no se alcanzaba la adherencia necesaria. Entre las posibilidades evaluadas, una de las más probables era la de utilizar un revestimiento de Cal hidratada con adición de cemento para mejorar la adherencia del material, aunque en el marco teórico de la presente investigación se mencionó que, para los procesos de restauración del patrimonio no se debe usar morteros a base de cemento Portland (por la incompatibilidad que este material presenta con los morteros a base de Cal, tanto en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas). La otra opción era la de utilizar morteros semejantes a los usados en la época de la colonia, para ello es necesario utilizar Cal viva y someterla a un proceso de apagado, este sería el caso ideal, pero por cuestiones de tiempo no es posible usar dicho material para revestir los muretes, especialmente porque el proceso de apagado de la Cal en la época colonial tomaba entre 4 a 6 meses de tiempo. Convenientemente se encontró una obra de restauración dentro del centro histórico de la ciudad de Cartagena donde se está usando un mortero de Cal apagada para la pega de los materiales.



Con la ayuda del director de la investigación se tuvo acceso a dicha obra y se pudo obtener este material para revestir los muretes de la presente investigación. En la siguiente figura se puede observar como fue el proceso de obtención de dicho material, además se observa la particular forma en que se encontraba almacenado dentro de albercas plásticas llenas de agua, técnica que se asemeja al proceso de apagado de la Cal viva en la época de la colonia.



Figura 52. Adquisición de la Cal apagada dentro de la obra de restauración en el centro histórico de Cartagena

Fuente. Autor.

Una vez que este material se trasladó al sitio donde se tenían los muretes se pudo iniciar nuevamente el proceso de revestimiento de estos mismos, previo al revestimiento se hizo el ensayo de resistencia a la compresión del mortero, gracias a este ensayo se pudo evidenciar que la relación volumétrica debía cambiar, se intentó utilizar una relación 1:2 (Cal:arena) pero la mezcla obtenida no presentaba ningún tipo de plasticidad o manejabilidad, era prácticamente arena, por ello se decidió adicionar una mayor cantidad de cal apagada (pasta compuesta por Cal y agua) hasta llegar a una relación volumétrica de 1:1 con la que si se obtenía una adecuada manejabilidad de la mezcla.

Siguiendo con el proceso de revestimiento de los muretes y con la autorización del director de la presente investigación, se tomó la decisión de retirar la capa exterior del pañete en



ambas caras de estos mismos para garantizar una mayor adherencia entre el mortero de revestimiento y la matriz de los muretes. Para esto se procedió de forma manual utilizando cuidadosamente un cincel y un mazo, este proceso se hizo con mucha cautela porque la baja resistencia del mortero de cal hidratada presente en la matriz de los muretes representaba una alta probabilidad de que estos fueran destruidos durante el mismo proceso de remoción del pañete.



Figura 53. Proceso de remoción del pañete exterior de los muretes

Fuente. Autor

Al terminar este proceso de remoción del pañete superficial, se pudo observar la tipología de los muretes y la manera en que se encontraban distribuidos los agregados dentro de estos mismos, con lo que se pudo aumentar la rugosidad de la superficie y por ende la adherencia que el mortero de revestimiento desarrollaría.



Continuamente, se procedió a realizar el proceso de revestimiento para lo cual se preparó la mezcla con la cal apagada y se le adicionó el mismo porcentaje de fibra, para la investigación en curso de 0.06%, se procedió a aplicar las capas de mortero y las muestras se dejaron fraguando durante 40 días para que estas alcanzaran una resistencia adecuada antes de ser ensayadas.



Figura 54. Revestimiento de muretes con mortero a base de Cal apagada reforzado con fibras al 0.06%

Fuente. Autor.



Después de transcurrir 40 días de fraguado se observó una problemática con el nuevo mortero de revestimiento aplicado, se trató de la baja resistencia dicho mortero alcanzó y del agrietamiento que este había sufrido en algunos muretes. Un detalle particular que es importante mencionar es el poco efecto que tuvo la adición de fibras sobre el material, se ha evidenciado en estudios anteriores que su uso reduce el agrietamiento por retracción plástica aparte que le brindan una mayor deformabilidad y ductilidad a los morteros. Aunque se encontró que, al disminuir el porcentaje de fibras presente en el mortero, cuando se adicionó el menor porcentaje analizado (0.06%), no se solucionó el problema de retracción plástica.



Figura 55. Agrietamiento y desprendimiento del mortero de revestimiento a base de cal apagada

Fuente. Autor

Luego de presentar esta nueva problemática y con el acompañamiento del director de la investigación, se estudiaron otras opciones para poder desarrollar el estudio, también surgieron muchas inquietudes que trataron de resolverse. Entre estas, la de evaluar que se



hizo al momento de hacer el mortero a base de cal apagada, conocer en qué se falló, el por qué no se obtuvo un mortero similar al que se encuentra en las estructuras coloniales como la contraescarpa del cordón amurallado de la ciudad. Sin mencionar que aún estaba la inquietud principal de esta investigación, determinar si es posible utilizar un mortero a base de cal reforzado con fibras con el que se alcance una mayor resistencia en los muros de mampostería colonial sin que haya necesidad de usar un elemento especial de refuerzo.

Teniendo claro que con la adición de fibras de polipropileno al mortero a base de cal no se obtuvo un buen resultado, entre las posibles alternativas a usar se encontró un mortero de restauración especial llamado Planitop HDM Restauro, fabricado por el distribuidor italiano MAPEI, entre sus características importantes se puede mencionar que es fabricado a base de Cal y comercialmente se presenta con una adición de fibras de vidrio, además que alcanza una alta resistencia a los pocos días de haberlo aplicado.

Para adquirir este material se tuvo que esperar un tiempo considerable puesto que el producto no se encontraba en la ciudad de Cartagena, aparte de estos inconvenientes de tiempo, una vez que se adquirió, pudo realizarse el revestimiento de los muretes con toda normalidad.

Para realizar la aplicación del revestimiento con este nuevo producto fue necesario remover los restos de mortero a base de cal apagada que aún se encontraban adheridos a los muretes, en la siguiente figura se puede observar el proceso completo donde dicho material se retiró y finalmente se revistieron los muretes con el producto Planitop HDM Restauro.



Figura 56. Preparación del mortero de restauración Planitop HDM Restauro

Fuente. Autor



Figura 57. Revestimiento de muretes con Planitop HDM Restauro

Fuente. Autor

Con este tercer producto los muretes adquirieron un mejor aspecto, el mortero hecho con Planitop HDM Restauro desarrolló una buena adherencia y un rápido proceso de fraguado por que se alcanzó en poco tiempo su resistencia deseada. Luego de este procedimiento los muretes se sometieron al ensayo destructivo de compresión simple.

6.7 Ensayo de compresión sobre los muretes

Aunque en la presente investigación se hace énfasis en muretes reforzados con un pañete de revestimiento, es importante mencionar que los muretes de referencia con los que se van a comparar los resultados, es decir, los muretes sin ningún tipo de reforzamiento, deben ser incluidos en los en los presentes resultados. Para esto se ensayaron un total de 10 muretes sin reforzar y 5 con el mortero de revestimiento. Las pruebas se llevaron a cabo en las



instalaciones del laboratorio GEOCONSULTAS LTDA, siguiendo con las recomendaciones establecidas en el título D de la NSR 10. La máquina que se usó fue una prensa electrohidráulica con una capacidad de 1000 KN, con una capacidad de ensayar muestras de entre los 5 cm y 75 cm de altura.



Figura 58. Ensayos de compresión simple sobre muretes sin reforzar

Fuente. Autor



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan uno a uno los resultados de los diferentes ensayos mencionados con anterioridad, de forma resumida, para cada ensayo se presenta una tabla y la respectiva interpretación de los datos obtenidos en estos mismos.

- Resultados ensayos de contenido de humedad

La humedad natural o el contenido de humedad es una de las características más importantes que usa para conocer el posible comportamiento del suelo y los agregados. Con el presente ensayo se pudo conocer la cantidad de agua (masa de agua) removida al secar el material, es decir, cuando pasa de un estado húmedo a uno seco. Esta propiedad puede convertirse en un problema cuando se presenta en cantidades incontroladas o no deseadas, existen proporciones de humedad esperables y recomendables para cada tipo de material por lo que se espera que un material maneje su humedad natural dentro de dicho “rango esperable”.



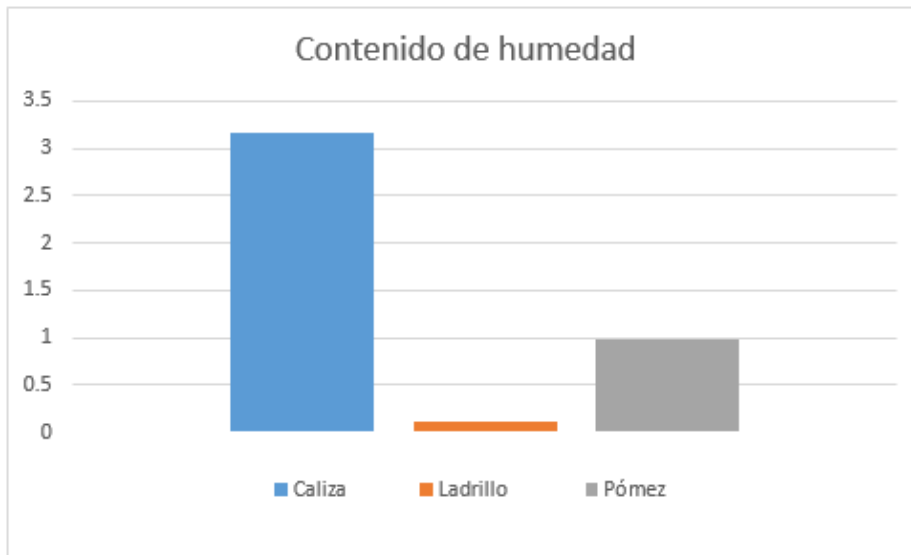
 Universidad de Cartagena Fundada en 1827				UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL				 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil			
Autor	Alvaro Yepes Tapia			Lugar	Universidad de Cartagena						
Descripción	Resultados de los diferentes materiales										
Ensayo	Contenido de humedad: INV E-122-07										
Agregado	Humedad (%)										
Caliza	3.17										
Ladrillo	0.12										
Pómez	0.98										

Tabla 2. Resultados de ensayo de contenido de humedad de los agregados

Fuente. Autor



Gráfica. Contenido de humedad de los agregados

Fuente. Autor

De acuerdo con la tabla y la gráfica anteriormente mostrada, el contenido de humedad en los diferentes agregados era bastante bajo. En especial la muestra de ladrillo militar es la que menor contenido de humedad presenta con un valor de 0.12%, este valor también es pequeño en la muestra de piedra pómez que registra un valor de 0.98%, por último, la muestra de piedra caliza es la que mayor porcentaje de humedad registró, alcanzando un valor de 3.17% en total. En general se puede asegurar que las muestras al momento de hacer los ensayos estaban con un contenido de humedad muy bajo y que es muy poco probable que dichos contenidos de humedad representaran un factor crítico al momento de construir los muretes de concreto colonial. De hecho, esta propiedad es indiferente cuando se trata de comparar un material con otro, puesto que, en la realidad todos los materiales trabajan como un conjunto que conforma la matriz de los muretes.

- **Resultado ensayo de resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles**

Con la ayuda de este ensayo se puede realizar una estimación relacionada con la calidad de los materiales o de qué tan competentes son distintas fuentes de agregados que posean composiciones mineralógicas similares. El desgaste producido por la abrasión o rozamiento es la pérdida superficial de una parte del material ensayado, reduciendo su tamaño en cierta proporción. Esta propiedad está ligada directamente con la durabilidad de los materiales, sus resultados permiten identificar el grado de unión entre partículas de un agregado y también ayuda para aprobar o descartar el uso de un determinado material.





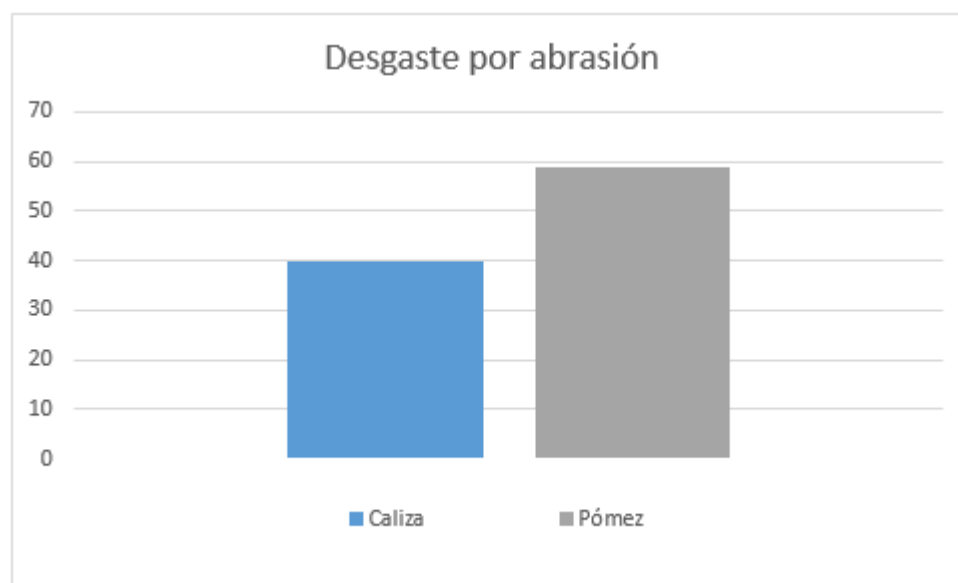
 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Resultados de los diferentes materiales		
Ensayo	Resistencia al desgaste. INV-E-219-07		
Agregado	Desgaste (%)		
Caliza	40		
Pómez	59		

Tabla 3. Resultados de resistencia al desgaste para los agregados utilizados

Fuente. Autor



Gráfica 1. Resultado de ensayo de resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles

Fuente. Autor

De los resultados anteriores se puede observar que la piedra pómez presenta un mayor porcentaje de desgaste entre los dos agregados ensayados. Para este caso particular se encontró un porcentaje de desgaste de 59% para la piedra Pómez y de 40% para la piedra caliza. En resumen, se puede asegurar que la calidad de la piedra caliza es mucho mayor y por ende será más durable que la piedra pómez. Esta característica también se observó al momento de romper los bloques de piedra en fragmentos pequeños, era mucho más fácil realizar este proceso de trituración manual cuando se trataba de piedra pómez, por lo que es



aceptable el resultado obtenido en el ensayo de resistencia al desgaste. Cabe mencionar que no se realizó ensayo de desgaste para el ladrillo militar puesto que este no tiene aplicabilidad sobre ese tipo de materiales, caso similar que sucede con ciertos materiales como adoquines o bloques, en donde el ensayo por la máquina de los ángeles no tiene aplicabilidad. En las investigaciones anteriores se observó que, aunque en estas se realizaron ensayos de resistencia al desgaste sobre los ladrillos, los resultados fueron mayores al 80% de desgaste en el material, dato que daría como resultado una muy mala calidad y baja durabilidad del material, se decidió no realizar este ensayo en los ladrillos porque no es un factor que condicione la calidad de un elemento compuesto como es el caso del concreto ciclópeo.

- Resultado de ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados

Conocer la gravedad específica de los materiales es importante para determinar el volumen que estos ocuparán en una mezcla para una obra específica, cuando se habla de la absorción, esta indica la cantidad de agua que lograría penetrar en los poros permeables de los agregados, especialmente cuando estos se encuentran en un medio saturado durante un tiempo prolongado.



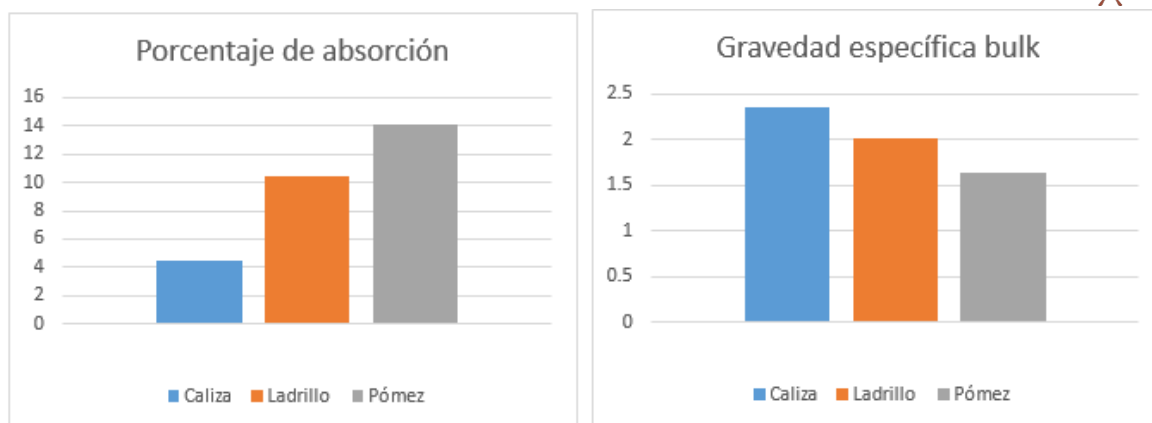
 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Resultados de los diferentes materiales		
Ensayo	Gravedad específica y absorción. INV 223-07		
Agregado	Absorción (%)	Gravedad específica	
Caliza	4.47	2.36	
Ladrillo	10.43	2.01	
Pómez	14.05	1.64	

Tabla 4. Resultado ensayo de gravedad específica y absorción

Fuente. Autor



Gráfica 2. Resultados ensayo de gravedad específica y absorción

Fuente. Autor

En la tabla y los gráficos anteriores se observan los resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de los diferentes agregados. Los valores de absorción son distintos para los diferentes materiales ensayados, la piedra caliza presenta una absorción de 4.47 % y una gravedad específica de 2.36, por su parte el ladrillo militar presenta una absorción de 10.43% y una gravedad específica de 2.01, finalmente la piedra pómez presentó una absorción de 14.05% y una gravedad específica de 1.64. Fácilmente se puede observar que existe una relación inversamente proporcional entre la gravedad específica y la absorción de los materiales, aquellos materiales que son más densos (es decir, tiene una alta gravedad específica, como la piedra caliza, por ejemplo) presentan un bajo porcentaje de absorción puesto que la cantidad de poros vacíos y que pueden ser ocupados por partículas de agua es mucho menor que en los materiales livianos (como la piedra pómez que tiene una baja gravedad específica y su naturaleza es porosa).

Para observar de manera resumida los ensayos de caracterización de agregados se presenta la siguiente tabla

RESUMEN DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS				
Material	Humedad (%)	Resistencia al desgaste (%)	Absorción (%)	Gravedad específica (adimensional)
Piedra Caliza	3.17	40	4.47	2.36
Piedra Pómez	0.98	59	14.05	1.64
Ladrillo militar	0.12	no realizado	10.43	2.01

Fuente. Autor



- Resultados de ensayos de resistencia a la compresión del mortero

Una de las propiedades más importantes de los materiales cementantes es la resistencia a la compresión, especialmente en el diseño de diferentes obras civiles; esto es debido a que la resistencia a la compresión es un factor determinante para que las diferentes partes de un concreto trabajen de manera homogénea, esto también aplica para concretos ciclópeos como los presentes en los muros de mampostería colonial estudiados en la presente investigación, donde el material cementante es la cal, que en adición de arena y agua producen el mortero conocido como argamasa, responsable de agrupar todos los agregados que componen los muretes hasta obtener un espécimen apto para ser sometido a ensayos en condiciones adecuadas.

Debido a que el material cementante corresponde a la Cal, los resultados esperados y obtenidos estaban por debajo de los rangos normales en los que se presenta el concreto normalmente. A continuación, se puede observar los resultados de los diferentes ensayos de resistencia a la compresión del mortero.



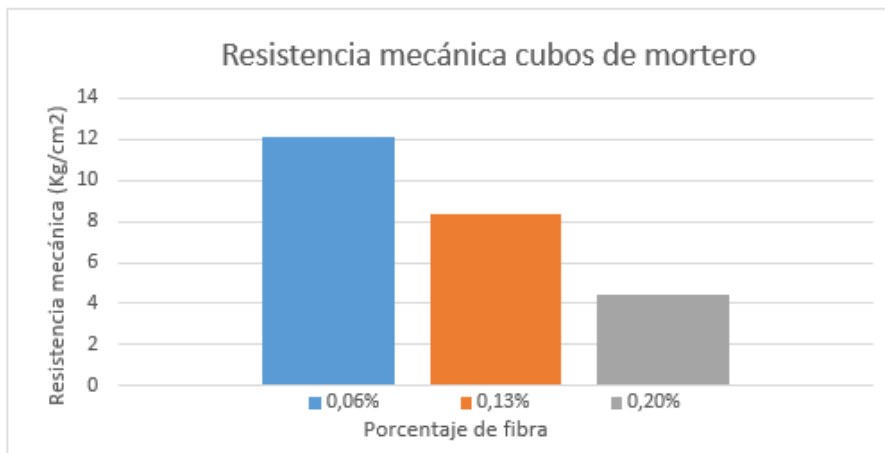
 Universidad de Cartagena Fundada en 1827		UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil	
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena		
Descripción	Resistencia del mortero con 30% de cemento para diferentes porcentajes de fibra				
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07				
% de fibra	Carga máxima promedio (KN)		Resistencia mecánica promedio (Kg/cm ²)		
0.06%	3.02		12.1		
0.13%	2.1		8.4		
0.20%	1.1		4.4		

Tabla 5. Resistencia a la compresión de cubos de mortero con adición de cemento para diferentes dosificaciones de fibra

Fuente. Autor



Gráfica 3. Resistencia del mortero (30% de cemento) y diferentes porcentajes de fibra

Fuente. Autor

De acuerdo con el resultado anterior se puede observar que la mezcla de mortero a base de cal con adición del 30% de cemento que desarrolla una mayor resistencia a la compresión es la que tiene un porcentaje de fibras de polipropileno equivalente al 0.06%, con una resistencia de 12.1 Kg/cm². También se observó que a medida este porcentaje de fibras aumentaba, la resistencia a la compresión en la mezcla disminuía. En la mezcla que tienen un porcentaje de fibras de 0.13% y 0.20% se alcanzó una resistencia promedio de 8.4 Kg/cm² y 4.4 Kg/cm² respectivamente. Con estos resultados se tomó la decisión de revestir los muretes con mortero a base de 100% de cal y una adición del 0.06% de fibras

Este ensayo se realizó de manera similar con muestras de mortero hechas 100% a base de cal hidratada con los mismos porcentajes de fibra analizados anteriormente, por tratarse de un mortero compuesto tan solo de Cal como material cementante, fue necesario esperar un mayor tiempo para que el proceso de fraguado se desarrollara adecuadamente, luego de 40 días de fraguado se encontró que los cubos de mortero a base de Cal con adición de fibra desarrollaron las siguientes resistencias mecánicas.





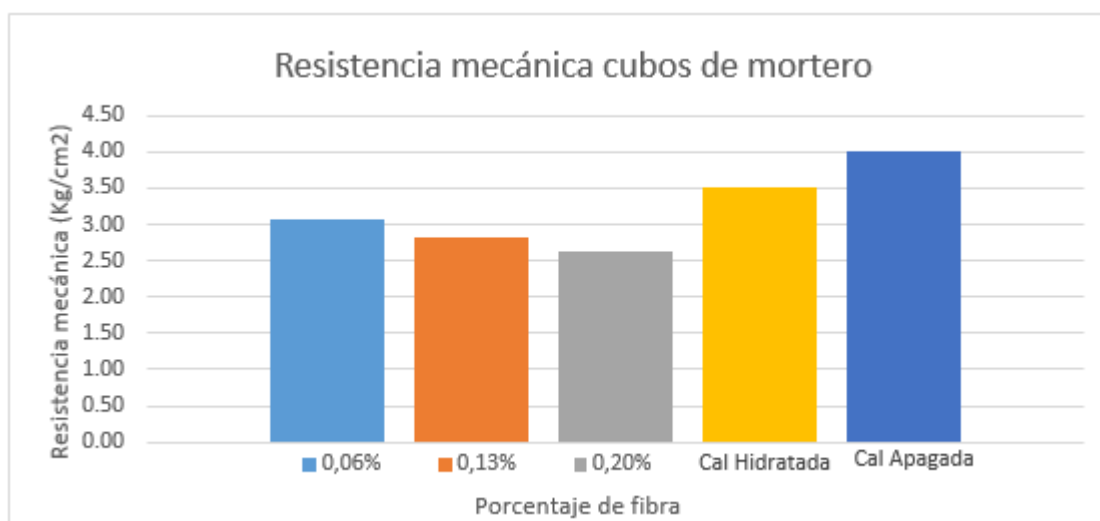
 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>		UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil	
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena		
Descripción	Resistencia del mortero a base de Cal con diferentes porcentajes de fibra				
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07				
% de fibra	Carga máxima promedio (KN)		Resistencia mecánica promedio (Kg/cm ²)		
0,06%	0,77		3,07		
0,13%	0,71		2,83		
0,20%	0,66		2,63		

Tabla 6. Ensayo de compresión sobre mortero a base de cal hidratada con adición de diferentes porcentajes de fibra

Fuente. Autor



Gráfica 4. Resistencia a la compresión del mortero a base 100% de Cal.

Fuente. Autor.

Al analizar los resultados encontrados en los ensayos de resistencia a la compresión del mortero se puede deducir que el simple hecho de adicionar cemento a la mezcla hace la resistencia de las muestras se vea afectada, en este caso al remplazar en la mezcla un 30% del peso en cal por cemento, se obtuvo un aumento promedio del 44% en la resistencia mecánica de las muestras de mortero con diferentes adiciones de fibra. En el caso de la muestra con menor porcentaje de fibra (correspondiente al 0.06%) se obtuvo una resistencia de 12.1 y 7.40 Kg/cm² para las muestras con y sin adición de cemento respectivamente.



Además de las muestras de mortero con adición de fibras de polipropileno, en la gráfica anterior se observan otros tipos de morteros, hechos con cal viva y cal apagada respectivamente. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión sobre estos morteros a base de cal sin ningún tipo de adición de fibras. El primero de estos morteros (la mezcla hecha con cal hidratada) fue el material con que se construyeron los muretes en la presente investigación y en las investigaciones anteriores que se tenían de antecedentes.

El segundo tipo de mortero es el que se fabricó con cal apagada proveniente de una obra en restauración del centro histórico de Cartagena, este material fue la segunda alternativa con la que se revistieron los muretes (alternativa con la cual se alcanzó una adecuada adherencia), como ya se mencionó anteriormente, el pañete hecho con cal hidratada no pudo adherirse a la superficie del murete y por eso se optó por buscar un material diferente pero que también fuera a base de Cal. Finalmente, los resultados encontrados en estos ensayos de resistencia a la compresión son los siguientes.



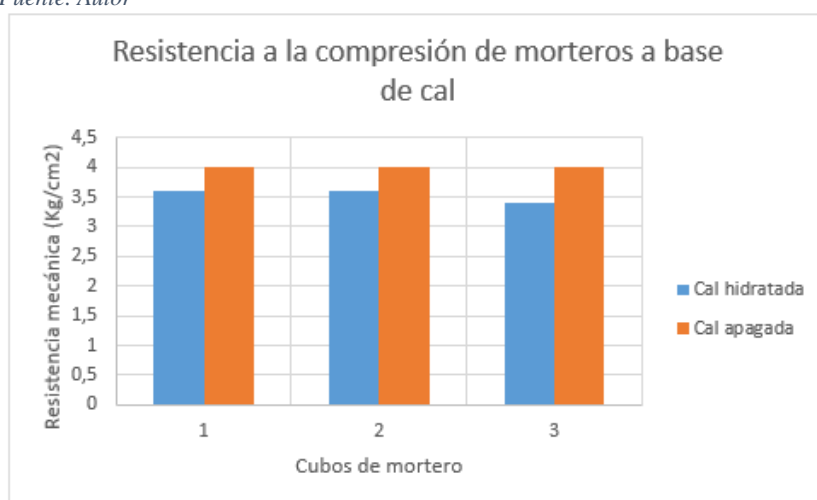
 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Resistencia a la compresión del mortero a base de distintos tipos de Cal		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Tipo de Cal	Carga máxima promedio (KN)	Resistencia mecánica promedio (Kg/cm ²)	
Cal hidratada	0,88	3,52	
Cal viva apagada	1,00	4,00	

Tabla 7. Resultados de ensayo a la compresión del mortero a base de diferentes tipos de Cal (promedio)
Fuente. Autor



Gráfica 5. Resistencias alcanzadas por los morteros a base de Cal
Fuente. Autor



Como era de esperarse, la resistencia alcanzada por morteros a base de Cal fue muy baja, la máxima resistencia que se alcanzó fue de 4,00 Kg/cm². Lo que no tiene mucho sentido dentro de estos resultados es que la resistencia alcanzada por el mortero a base de Cal apagada sea tan cercana a la que alcanzó el mortero hecho con cal hidratada.

En la siguiente tabla se muestra de manera resumida los resultados que se encontraron en los ensayos de resistencia a la compresión del mortero para cada una de las mezclas que se estudiaron anteriormente. Además, se incluye la resistencia alcanzada por el mortero de pega utilizado en uno de los estudios previos que sirvieron de base para la presente investigación.

Resumen de ensayos, resistencia a la compresión del mortero (Kg/cm ²)				
Tipo de mortero ensayado				
Sin fibras		Con fibras		
A base de Cal viva apagada	100% a base de Cal hidratada	Porcentaje de fibras	70% Cal + 30% cemento	100% a base de cal hidratada
4.00	3.52	0.06%	12.10	3.07
		0.13%	8.40	2.83
		0.20%	4.40	2.63
Acuña A (2018)	2.11			

Fuente. Autor y Acuña A (2018)

Con esta tabla se generalizan todos los resultados, se observa que entre los morteros sin fibras hay un mejor comportamiento cuando se tiene como componente principal cal viva apagada, además, el mortero con el que se construyeron los muretes presenta mejores resultados en comparación con el estudio previo realizado por Acuña A (2018). Se observa el aumento de la resistencia que puede alcanzarse con la adición de cemento, incluso cuando el mortero tiene adición de fibras y finalmente, el detrimento que general la presencia de fibras en los morteros a base de cal, a mayor porcentaje de fibras, menores resistencias mecánicas de los morteros. Es importante hacer la aclaración de que el mortero 100% a base de cal hidratada se utilizó para construir el murete (con este se pegaron los agregados) en cambio, los morteros con adición de fibras se usaron para usarlos como revestimiento de refuerzo.

Una vez que el primer mortero de revestimiento hecho con cal hidratada no funcionó, se estudió más a fondo la forma de adecuada de fabricar morteros con Cal.

En una consulta realizada a un arquitecto restaurador de la ciudad, este mencionó que para efectos de restauración no debe usarse la Cal hidratada, sino utilizar Cal viva y someterla a un proceso de apagado artesanal en albercas llenas de agua. Una vez que se tuviera cal apagada el mortero que producía este material desarrollaba una mayor plasticidad y resistencia que los morteros hechos con cal hidratada. Martínez W. Et Al (2008) encontraron que el área superficial de la cal apagada artesanalmente es 600% superior a la cal comercial



industrial, esto podía ser la razón por la cual la resistencia mecánica de los morteros elaborados con cal apagada artesanalmente era mayor. Además, la principal razón por la que esta característica se presentaba era por el proceso de apagado que se le daba al material.

Además, dentro de diferentes estudios se ha encontrado que los morteros apagados en pasta presentan una mayor velocidad de carbonatación y consecuentemente desarrollan una mayor resistencia mecánica que los hechos con cales en polvo, aunque hay evidencia científica que con cales en polvo puede lograrse una alta velocidad de carbonatación, esto se logra cuando la materia prima (piedra caliza) tiene una composición óptima y el proceso de fabricación de la cal en polvo es muy controlado. (Luque A. Et. Al. 2006).

Debido a que la cal apagada que se usó como segunda alternativa fue un material que se obtuvo de una obra de restauración donde no se le realizó una caracterización adecuada, no se pueden sacar conclusiones que sean acertadas. Es posible que la materia prima con la que se hizo la cal apagada fuese de baja calidad, quizás no logró apagarse durante el tiempo recomendado o el material tenía impurezas que le disminuían su resistencia mecánica una vez fraguara, aparte que existe la posibilidad de que la cal hidratada utilizada tenía una alta calidad de fabricación y pureza.

Además de los diferentes tipos de Cal, es importante ver qué sucede con la dosificación de arena que debe usarse para hacer morteros a base de Cal, en el presente estudio se usó una relación volumétrica 1:2 (Cal:arena respectivamente) para la cal hidratada y 1:1 para la pasta de cal apagada, surgen muchas dudas en cuanto a la relación óptima que debe usarse, esta es una propiedad que debe ser analizada a fondo en una nueva investigación, así como los tipos de arena que mejores propiedades poseen para fabricar morteros a base de cal.

- **Resultados de ensayos no destructivos de ultrasonido sobre los muretes**

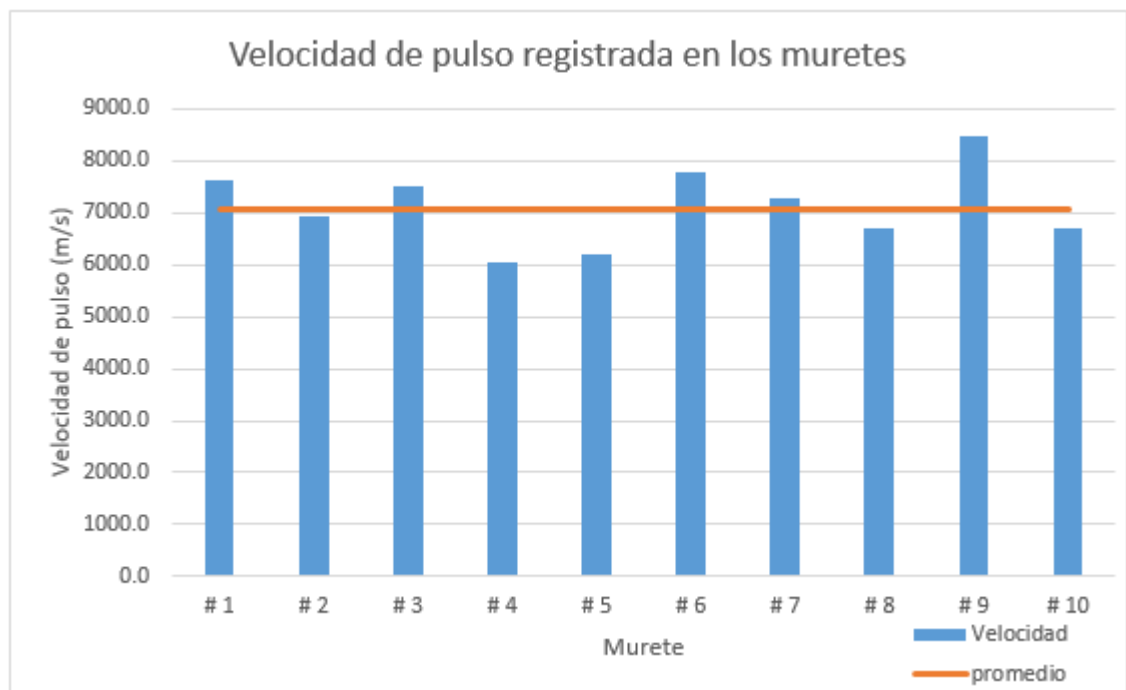
Aunque en la presente investigación se está tomando como objeto de estudio el comportamiento mecánico de 5 muretes reforzados con un pañete de revestimiento, ya se aclaró con anterioridad que existen otros muros sin reforzar que serán tomados como datos de referencia y que además hacen parte de una mayor investigación que está siendo desarrollada por el grupo de investigación Esconpat y que está siendo dirigida por el docente Arnoldo Berrocal olave, PhD. A dichos muros no reforzados se les realizaron los respectivos ensayos de ultrasonido y los valores de velocidad de pulso en cada uno de ellos quedó registrada. (Ver la siguiente tabla)



Autor		Alvaro Yepes Tapia								Lugar							
Descripción		Muretes de mampostería colonial tipo I (cascoteo) sin reforzamiento															
Ensayo		Lectura vertical, tiempo de recorrido de la onda de ultrasonido para los muretes (μs)															
Murete	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MEDIA	MIN	MAX	Desv. Est.	Coef. Var.	Vel. (m/s)	
# 1	6.80	6.70	7.30	6.20	5.60	5.80	7.30	6.80	6.00	6.90	6.5	5.6	7.3	0.6	9%	7645.3	
# 2	8.20	6.60	8.10	6.90	7.90	6.70	8.00	6.80	7.30	5.60	7.2	5.6	8.2	0.8	12%	6934.8	
# 3	6.20	6.00	7.50	6.50	7.10	6.40	7.60	6.00	7.20	5.90	6.6	5.9	7.6	0.7	10%	7530.1	
# 4	9.80	8.80	10.30	6.60	10.30	8.40	5.60	7.80	8.10	7.00	8.3	5.6	10.3	1.6	19%	6045.9	
# 5	8.30	9.80	7.90	8.60	6.00	7.60	6.70	8.80	9.90	7.20	8.1	6.0	9.9	1.3	16%	6188.1	
# 6	5.60	5.30	6.50	5.60	5.90	6.90	6.30	6.90	8.30	6.80	6.4	5.3	8.3	0.9	14%	7800.3	
# 7	9.00	6.80	6.70	5.40	8.90	6.70	6.50	6.70	5.40	6.70	6.9	5.4	9.0	1.2	18%	7267.4	
# 8	8.80	7.90	7.10	9.00	7.70	5.90	6.30	6.10	8.30	7.50	7.5	5.9	9.0	1.1	15%	6702.4	
# 9	7.00	5.50	6.40	5.10	5.80	6.10	5.50	5.10	5.70	6.80	5.9	5.1	7.0	0.7	11%	8474.6	
# 10	6.50	5.90	7.60	8.10	7.20	7.20	5.50	7.80	9.10	9.90	7.5	5.5	9.9	1.4	18%	6684.5	
Resultado general	Tiempo promedio (μs)				7.09		Altura muretes (m)			0.50		Velocidad promedio (m/s)			7055.17		

Tabla 8. Velocidad de pulso para los muretes sin reforzamiento

Fuente. Autor.



Gráfica 6. Velocidades de pulso de cada murete Vs velocidad de pulso promedio de la muestra

Fuente. Autor.



De los resultados anteriores se puede observar que todos los muros presentan una notable dispersión en los registros de las velocidades de pulso, esto es común de esperarse por la naturaleza anisotrópica del concreto colonial, aunque en la tabla se puede observar en color rojo que los muretes #4, #5, #7 y #10 son los que mayor dispersión de sus lecturas presentan. Alcanzando coeficientes de variación de 19%, 16%, 18% y 18% respectivamente. De manera similar se observa que, en el gráfico dichos muretes con mayor variación son los que registran una menor velocidad de pulso, todos están por debajo del promedio de las velocidades a excepción del murete #7. De todas las lecturas, el murete que menos velocidad de pulso registra es el #4 con un valor de 6045,9 m/s y la mayor de las lecturas registradas se presentó en el murete #9 con un valor de 8474.6 m/s.

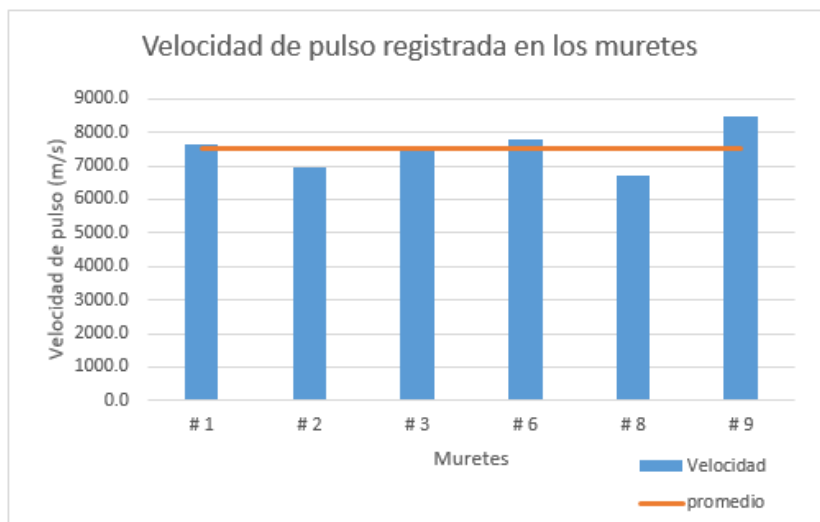
En los resultados de pruebas de ultrasonido sobre estos muretes no se calculó el valor de resistencia a la compresión, este es el uso que se le da al ensayo cuando se emplea en estructuras de concreto armado, para este tipo de estructuras antiguas conformadas por concretos ciclópeos y con morteros a base de Cal no se puede estimar la resistencia mecánica utilizando la velocidad de pulso. Estudios anteriores han tomado estos valores de resistencia generado por el equipo de ultrasonido y los han comparado con los ensayos destructivos de resistencia a la compresión, obteniendo diferencias muy altas entre ambos ensayos. En una investigación reciente donde se estudiaron muretes con dimensiones y materiales similares a los estudiados actualmente se encontró que la resistencia promedio obtenida con el ultrasonido fue de 35.56 Kg/cm², pero en los ensayos destructivos sólo se logró una resistencia de 3.69 Kg/cm², aproximadamente el 10% del valor obtenido con el ultrasonido. (Acuña A. 2018).

Así mismo, en un estudio anterior estos ensayos se han realizado tanto en un sector de la contraescarpa de las murallas de la ciudad de Cartagena, compuesta por materiales antiguos con características similares a los utilizados en la presente investigación (roca caliza, roca coralina y fragmentos de ladrillo militar) como en muretes construidos con materiales antiguos rescatados de casas coloniales pertenecientes al centro histórico de la ciudad de Cartagena, entre los resultados obtenidos con el equipo de ultrasonido encontraron resistencias de 39.88 Kg/cm² y 93.97 Kg/cm² respectivamente. Cuando los muretes estudiados en esta investigación se ensayaron a la compresión, los resultados de resistencia mecánica obtenida se presentaron en un rango de 3.09 Kg/cm² y 5.08 Kg/cm², valores que están muy por debajo de las lecturas con el equipo de ultrasonido. (Camargo A. & Gamarra J. 2016)

Teniendo en cuenta dichas investigaciones pasadas, la resistencia mecánica obtenida con el equipo de ultrasonido en la presente investigación no será tomada en cuenta. El dato importante que se analizó fue la velocidad de pulso, con este parámetro y con el valor de resistencia a la compresión del ensayo destructivo de compresión simple se buscó hacer una correlación que será presentada más adelante.



Como parte de un ejercicio académico se graficaron las velocidades de pulso para los muretes que registraron la menor dispersión en sus lecturas, en este caso se omitieron los resultados para los muretes #4, #5, #7 y #10. En la siguiente gráfica se puede observar el resultado obtenido.



Gráfica 7. Velocidad de pulso registrada en los muretes que presentaron menor dispersión

Fuente. Autor

En este caso, se observa que el promedio de las velocidades de pulso aumentó de 7055.2 m/s a 7514.6 m/s. Hay un caso especial con el murete #9 puesto que, aunque no presenta una dispersión de datos tan alta, la velocidad de pulso que se registra en este es mucho más alta que el resto de muretes, es el único murete de toda la muestra que presenta una velocidad superior a 8000 m/s. Estas variaciones son normales en este tipo de materiales, como se mencionó anteriormente, son elementos anisotrópicos con una gran discontinuidad entre los elementos que componen su matriz. En ningún caso se podrán usar estas velocidades para estimar la calidad de los concretos coloniales, puesto que las velocidades de pulso por encima de los 4575 m/s se presentan en concretos de excelente calidad. (Solís R. Et. Al. 2004).

Velocidad ultrasónica, v (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4\ 575$	Excelente
$4\ 575 > V > 3\ 660$	Bueno
$3\ 660 > V > 3\ 050$	Cuestionable
$3\ 050 > V > 2\ 135$	Pobre
$V < 2\ 135$	Muy pobre

Fuente. Solís R. Et. Al. 2004



- **Resultados de ensayos destructivos de compresión simple sobre muretes reforzados y no reforzados**

Además de los 5 muretes reforzados con un revestimiento de mortero reforzado con fibra, la presente investigación tiene como valores de referencia la resistencia desarrollada por muretes de mampostería colonial sin ningún tipo de reforzamiento. Para esta actividad se realizaron 10 muretes con los mismos materiales y método constructivo, se midieron sus dimensiones y se ensayaron en el laboratorio GEOCONSULTAS LTDA de la ciudad de Cartagena. Para un llevar a cabo un adecuado procedimiento se siguieron los lineamientos expuestos en la norma colombiana NSR-10 título D y se siguieron las recomendaciones del director de la investigación en cuanto al manejo y cuidado previo al ensayo sobre dichos muretes.



Figura 59. Ensayos destructivos de compresión simple sobre muretes sin refuerzo

Fuente. Autor

Todos los muretes al ser ensayados presentaron un mecanismo de falla similar, esta se caracterizó por ser una grieta desarrollada en la línea que delimitaba un agregado y otro, es decir, la falla se presentó en el mortero de pega. En las investigaciones anteriores también se presentó esta misma falla típica por lo que se puede asegurar que las condiciones de los muretes son similares a los que se analizaron en dichos estudios previos y que en todos los



casos, el mortero de pega a base de Cal es el factor que determina la resistencia de los muretes. Los resultados de los muretes se presentan a continuación:

Autor		Alvaro Yepes Tapia	Lugar		GEOCONSULTAS LTDA	
Descripción		Muros de mampostería colonial tipo I sin reforzar				
Ensayo		Ensayo destructivo de compresión simple				
Muestra	Area (cm ²)	Carga máx. (KN)	Resistencia (Kg/cm ²)	Factor de corrección	Resistencia corregida (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
Murete 1	800	77.3	9.66	1.05	10.14	4.39
Murete 2	800	13.7	1.71	1.05	1.8	
Murete 3	800	37.7	4.71	1.05	4.95	
Murete 4	800	36.6	4.58	1.05	4.81	
Murete 5	800	28.9	3.61	1.05	3.79	
Murete 6	800					
Murete 7	800	34.6	4.32	1.05	4.54	
Murete 8	800	56.0	7.00	1.05	7.35	
Murete 9	800	26.6	3.32	1.05	3.49	
Murete 10	800					

Tabla 9. Resultados ensayo de compresión simple sobre muretes no reforzados

Fuente. Autor

En los resultados anteriores se puede observar el esfuerzo de falla que alcanzaron los muretes una vez se sometieron al ensayo destructivo de compresión simple. Hubo problemas con los muretes 6 y 10 al momento de ser ensayados y no pudo tomarse una lectura correcta de sus resistencias, por esta razón hacen falta estos valores dentro de la tabla, otro aspecto importante de mencionar es la alta resistencia que alcanzó el murete #1 (10.14 Kg/cm²), valor que se sale de la tendencia del resto de muestras, para efectos prácticos y de tomar la mejor representación posible de la muestra, se decidió por omitir este resultado para el cálculo de la resistencia promedio de los muretes. Consecuentemente, se tiene que para el conjunto de muretes de mampostería colonial tipo I sin reforzar se alcanza una resistencia promedio de 4.39 Kg/cm².

Esta resistencia coincide con los resultados de la investigación “Comparación de resistencia a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y fortificaciones del centro histórico de Cartagena de Indias y muretes fabricados bajo criterios de

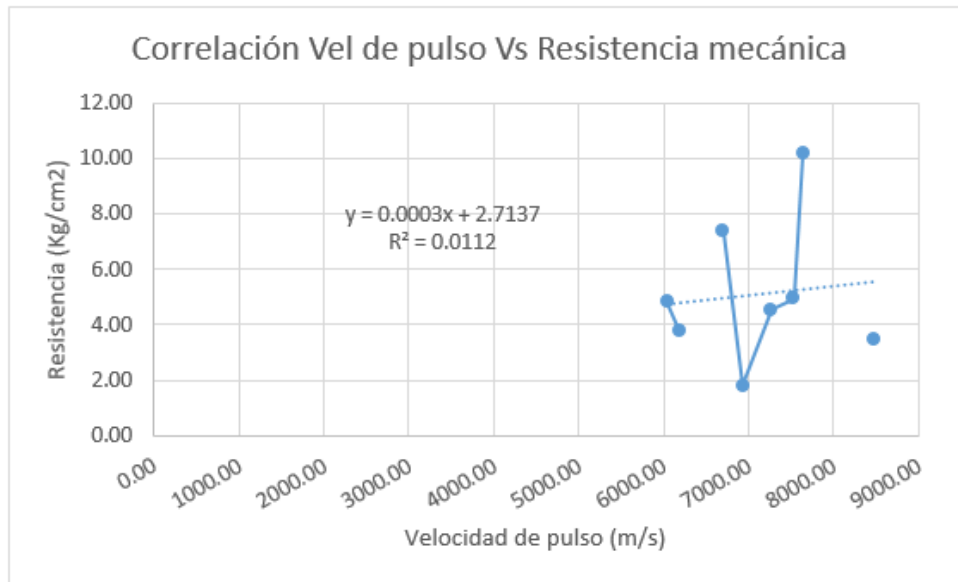


construcción semejantes” (Camargo & Gamarra, 2016), donde se registró que la resistencia a la compresión de muretes de mampostería colonial fabricados con materiales actuales, pero con técnicas de construcción antiguas, se encuentran en un rango entre 3.09 kg/cm^2 y 5.08 Kg/cm^2 . Con esta propiedad característica como lo es la resistencia mecánica, se puede asegurar que los resultados actuales son semejantes a los resultados encontrados en las investigaciones anteriores. Hay un detalle que puede mencionarse y es que algunos muretes desarrollaron resistencias altas, 7.35 kg/cm^2 y 10.14 kg/cm^2 , por ejemplo. Estos valores están por fuera del rango comparativo que se tiene como base, esto es común que suceda en este tipo de ensayos puesto que, sin importar la similitud que se tenga en los materiales y técnicas constructivas utilizadas, el proceso de fabricación y manipulación de materiales tan heterogéneos y anisotrópicos como lo es este concreto colonial siempre tendrá un aspecto empírico que puede tener una gran influencia en los resultados obtenidos.

Aunque los resultados de estos ensayos coinciden con investigaciones anteriores realizadas sobre muretes similares, es importante mencionar que estas resistencias desarrolladas por los materiales son muy bajas, al menos al compararse con otra investigación (España, Puello & Almanza, 2009); donde al estudiar ciertos tipos de mampostería colonial se encontraron resistencias mecánicas con valores entre 22.1 kg/cm^2 y hasta 57.98 kg/cm^2 . Aunque estos valores son el resultado de estudios meramente teóricos donde se calculó la resistencia de la mampostería haciendo una sumatoria de la resistencia de cada uno de los materiales que componen a esta misma, dejando de lado factores importantes como la interacción de los diferentes materiales, el proceso de construcción de los muretes, factores ambientales que puedan afectar la mampostería y el estado de deterioro en el que se encuentran dichos materiales.

Ante la problemática de las bajas resistencias alcanzadas por los muretes construidos con materiales actuales y teniendo en cuenta que el mecanismo de falla que gobierna en los muretes siempre se ha presentado en el mortero de pega, surge la posibilidad de que se use Cal viva para el proceso de construcción de los muretes en futuras investigaciones, este material se asemeja en mayor grado al tipo de mortero usado en la época de la colonia y su calidad es mejor que la del mortero a base de Cal hidratada.

Uno de los objetivos era encontrar una correlación entre velocidad de pulso con la resistencia mecánica de los muretes, para ello se tomaron las lecturas del ultrasonido y se compararon con las resistencias mecánicas de sus respectivos muretes y se graficaron estos datos. En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de estas dos variables.



Gráfica 8. Velocidad de pulso Vs Resistencia mecánica de los muretes

Fuente. Autor

Como se puede observar en la gráfica anterior, los datos obtenidos no siguen una tendencia clara, se caracterizan por ser muy dispersos y la correlación planteada no es representativa. El principal problema con estos datos se encuentra en que todos los muretes fueron hechos con las mismas condiciones, por lo que sus resistencias mecánicas serán valores muy parecidos, aparte que por la naturaleza anisotrópica del material y su falta de homogeneidad, las velocidades de pulso registradas estarán dentro de un rango muy variado. Esto da como resultado el tan alto grado de dispersión de la gráfica. Es posible que, si al construir un conjunto de muretes para una muestra se usan diferentes tipos de mortero a base de Cal, si se toman distintas dosificaciones de los agregados y aparte de eso se varía la relación agua/material cementante, las resistencias de dichos muretes serán mucho más variadas, es posible que con estas medidas se obtengan velocidades que abarquen un mayor rango de datos (por ejemplo, obtener velocidades de 2000 m/s o quizás mayores a los 9000 m/s). Si se emplean estas medidas, es posible que surja cierta tendencia entre los valores de velocidad encontradas con el ultrasonido y la resistencia mecánica de los muretes. Por el momento, no es posible encontrar una correlación con los valores que se tienen actualmente.

Ahora bien, los muretes reforzados con mortero de revestimiento presentaron un comportamiento similar a los muretes sin refuerzo, incluso algunos de los no reforzados desarrollaron mayor resistencia mecánica que los reforzados. Cabe aclarar que no se pudo ensayar muretes reforzados con morteros a base de cal (ni hidratada ni apagada), por problemas de falta de adherencia y luego retracción plástica ambos revestimientos fallaron. Por tanto, los resultados que se mostrarán son los obtenidos cuando los muretes se revistieron



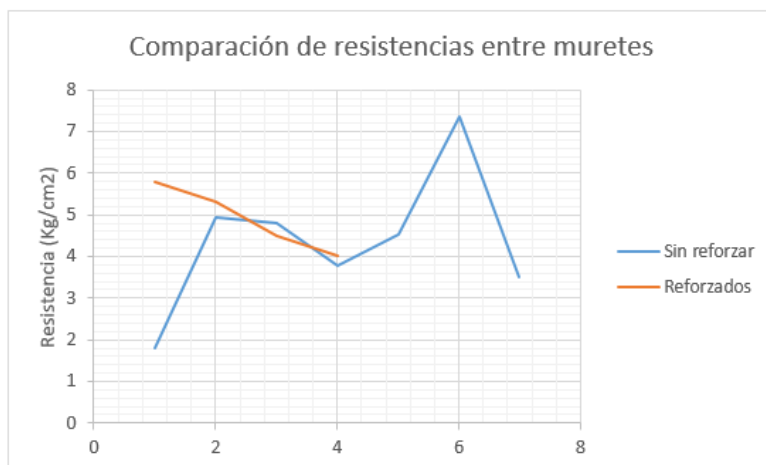
con el mortero especial de restauración Planitop HDM Restauero. En la siguiente tabla se puede observar el resultado del esfuerzo de compresión alcanzado por cada murete al momento de la falla.

Murete	Resistencia (Mpa)	Resistencia (Kg/cm ²)
1	0.58	5.80
2	0.53	5.30
3	0.45	4.50
4	0.40	4.00
5	-----	-----

Tabla 10. Esfuerzo de falla en muretes reforzados con mortero de restauración

Fuente. GEOCONSULTAS LTDA

Un inconveniente relacionado con el mal estado de uno de los muretes y su deterioro al momento de manipularlo impidió que a este se le realizara el ensayo destructivo de compresión simple, sin embargo, con los demás muretes si pudo desarrollarse de forma normal dicho ensayo. En la siguiente gráfica se comparan las resistencias alcanzadas por los dos tipos de muretes (con y sin refuerzo).



Gráfica 9. Comparación de esfuerzos de falla entre muretes reforzados y no reforzados

Fuente. Autor

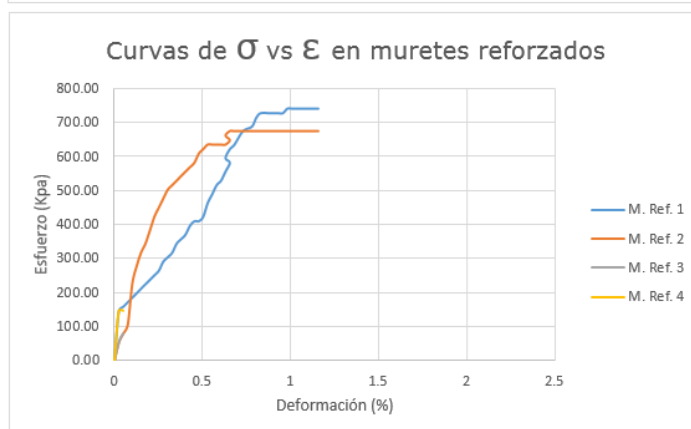
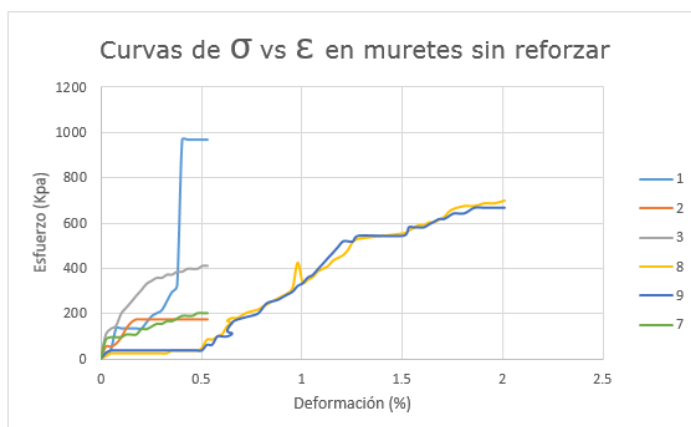
Para hacer una comparación rápida con los estudios previos, a continuación, se presenta una tabla como forma de resumen donde se plantean los resultados obtenidos en la presente investigación y los que se encontraron en los dos estudios previos que se tomaron como base principal. En las tres investigaciones se construyeron muretes de mampostería colonial siguiendo una misma metodología y utilizando materiales similares, existían algunas diferencias con respecto a los factores que se evaluaban y los materiales adicionales utilizados en cada estudio, es por ello que se realiza una pequeña descripción de las características en cada tipo de murete estudiado por los diferentes autores.



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO DE MURETES (Kg/cm ²)								
Fuente de información: estudios previos							Investigación actual	
Características del murete	Gamarra & Bocanegra (2016)			Acuña A (2018)			Autor	
	Muretes sin refuerzo construido con materiales actuales	Muretes extraídos de una obra de restauración en el centro histórico	Murete sin refuerzo hecho de materiales antiguos y argamasa nueva	Muretes sin refuerzo hecho con materiales actuales	Muretes reforzados con fibra de carbono	Muretes reforzados con fibra de basalto	Muretes sin refuerzo hechos con materiales actuales	Muretes reforzados con mortero de revestimiento (Planitop HDM Restauo)
Valor de resistencia alcanzado (Kg/cm ²)	4.46	6.26	10.98	3.69	4.98	5.29	4.39	4.9

Fuente. Autor, Gamarra & bocanegra (2016) y Acuña A (2018).

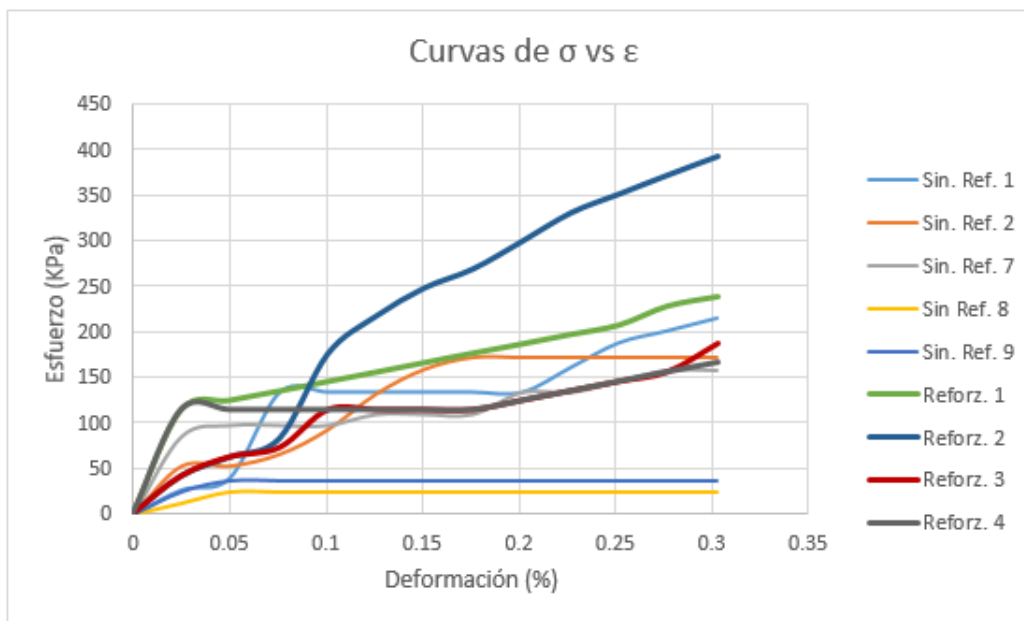
En cuanto a las curvas de esfuerzo Vs deformación de los muretes, a continuación, se presenta un resumen del comportamiento que tuvieron los sin reforzar, así como los reforzados:



Fuente. GEOCONSULTAS LTDA.



Para tener una mejor apreciación del comportamiento mecánico de estos ensayos se incluirán las curvas anteriores en una sola gráfica, además de que se ilustrará cada una de estas hasta que la deformación unitaria del murete alcance el 30%.



Gráfica 10. Comparación en las curvas de σ vs ϵ para los muretes con y sin refuerzo aplicado

Fuente. Autor

Al observar la gráfica anterior se observa que cuando la deformación unitaria alcanza un 30% en los muretes, los esfuerzos alcanzados por los muretes revestidos y sin revestir no presentan una gran diferencia. En el resto de la curva se observa cierto aumento de la rigidez en los muretes revestidos (ver siguiente gráfica). En este sentido se puede decir que revestir la mampostería colonial tipo I con mortero reforzado con fibras ayuda a reducir en cierto grado la deformabilidad del murete, el inconveniente encontrado en estos resultados es que el aumento de la resistencia y a las condiciones de deformabilidad no es sustancial. Por un lado, la resistencia mecánica estuvo en el rango de 1.8 a 7.35 Kg/cm² con el murete sin revestimiento y de 4.00 a 5.80 Kg/cm² cuando se aplicó el mortero de refuerzo. Por otro lado, en la deformabilidad de los muretes sin revestimiento se necesitaba aproximadamente 0,2 MPa para alcanzar un 60% de deformación unitaria y en los muretes reforzados era necesario en promedio 0,41 MPa para alcanzar ese grado de deformación. Como puede observarse, existe una mejoría en las condiciones mecánicas de los muretes, pero esta no es lo suficientemente alta como para considerar el revestimiento con mortero reforzado con fibras como una buena técnica de restauración y reforzamiento.



Gráfica 11. Curvas de esfuerzo Vs. Deformación para los muretes con y sin revestimiento.

Fuente. Autor

Los módulos de elasticidad obtenidos en cada ensayo realizado sobre los distintos muretes se tienen en la siguiente tabla:

# Murete	Módulo (Kpa)	Módulo (Kg/cm2)
1	106404	1085.02
2	156555	1596.42
3	125244	1277.14
6	120105	1224.73
8	54448	555.22
9	89687	914.56

Tabla 11. Módulos de elasticidad de los muretes sin reforzar

Fuente. GEOCONSULTAS LTDA

Los módulos encontrados para los muretes son valores que se encuentran algo dispersos, así como sucedió con las resistencias mecánicas también pasa con el módulo de elasticidad encontrado en los ensayos. Estos valores, aunque son esperados en este tipo de mampostería, hay muchos factores que los afectan, desde el proceso constructivo de los muretes, alteraciones en el transporte de estos mismos y hasta el equipo con que se ensayaron, un ejemplo puede ser el deformímetro con que se hicieron las lecturas durante la prueba de compresión simple, este no era digital sino analógico, esto hace que las lecturas de deformación no puedan ser tomadas por una máquina calibrada sino por una persona, lo cual conlleva a posibles errores.



6. CONCLUSIONES

Las muestras de mortero se pudieron ensayar con diferentes dosificaciones de fibra de polipropileno, las dosificaciones escogidas para el alcance del presente estudio fueron de 0.06%, 0.13% y 0.20% respectivamente. Para cada porcentaje de fibra se construyeron 3 cubos de mortero hecho a base de 70% cal hidratada y 30% cemento (en la fase inicial), los resultados del ensayo a compresión de estos cubos se tomaron para escoger la dosificación de fibra óptima a utilizar en el pañete de revestimiento, para la fase final se dejaron como muestras testigos 3 cubos de mortero hecho a base 100% de cal hidratada para cada porcentaje de fibra, estas presentan un proceso de fraguado lento y requerían de un mayor tiempo para ser ensayadas, con estos cubos testigos se verificó que los resultados obtenidos eran similares tanto para el mortero a base de cal como para el mortero hecho de cal y cemento.

Con base en los resultados de resistencia a la compresión de los morteros se puede concluir que la adición de fibras en cualquier porcentaje disminuye la capacidad o resistencia mecánica de estos mismos, cuando se hicieron pruebas con el mortero hecho a base de cal con adición de un 30% de cemento, así como cuando se ensayaron los que estaban constituidos 100% a base de Cal hidratada, la relación que se encontró entre el porcentaje de fibras adicionado y la resistencia mecánica alcanzada por las muestras fue inversamente proporcional, las resistencias más bajas se obtuvieron cuando el porcentaje de fibras adicionado fue el más alto y viceversa. En este caso se alcanzó 4.4 Kg/cm² y 3.4 kg/cm² (para mortero con y sin adición de cemento) cuando el porcentaje de fibras era de 0.20%, en cambio, las resistencias fueron de 12.1 kg/cm² y 7.40 kg/cm² respectivamente cuando las fibras se adicionaron en un 0.06%. En la revisión bibliográfica realizada al inicio de esta investigación se encontró un resultado similar, la adición de distintos tipos de fibra, en la mayoría de los casos presentaban disminución de la resistencia, sin importar si se trataba de fibras de vidrio, polipropileno, basalto o de carbono. Tan solo en un estudio se encontró que el 0.06% de fibras de polipropileno aumentaba la resistencia a la compresión y hacía que los morteros desarrollaran cierta ductilidad luego de haber fallado (Lucolano, Et Al, 2013).

Aunque por haber desarrollado mayor resistencia mecánica se escogió como porcentaje óptimo de fibras el de 0.06%, este porcentaje no es el ideal puesto que el agrietamiento por retracción plástica afectó a 2 de los muretes revestidos con mortero hecho de Cal apagada, efecto que se debe solucionar al adicionar fibras a dicho material. Debido a que los muretes no pudieron ensayarse cuando se revistieron con morteros hechos de cal hidratada o cal apagada, no pudo determinarse un porcentaje de fibra óptimo y por ende las propiedades mecánicas de los muretes no se lograron estudiar. No es posible conocer un porcentaje óptimo de fibras si el pañete por sí solo no funciona o no se adhiere al murete.

Para el caso del mortero especial de restauración, se conoce que este tiene la adición de fibras de vidrio, pero por ser un producto comercializado por un distribuidor especial no se sabe el



porcentaje exacto de estas, sin embargo, el comportamiento mecánico de los muretes varió en cierto grado luego de revestirlos. La resistencia mecánica promedio aumentó aproximadamente en un 11%, esta pasó de 0,43 a 0,49 MPa entre los muretes sin reforzar y los revestidos con Planitop respectivamente. En cuanto a la deformabilidad de los muretes se evidenció que al revestirlos los muretes se volvían un poco más rígidos, para una deformación unitaria del 60% el esfuerzo de compresión requerido pasó de 0.2 a 0.41 MPa. Aunque se haya presentado una mejoría en el comportamiento mecánico de los muretes, esta no fue lo suficientemente alta o sustancial. En un estudio previo donde se analizaron muretes similares y les aplicaron refuerzo con fibras de carbono y basalto se observó una mejora mucho mayor, pasando de 3.69 Kg/cm² para los muretes sin reforzar hasta alcanzar una resistencia promedio de 4.98 Kg/cm² y 5.29 Kg/cm² para los muretes reforzados con fibras de carbono y fibras de basalto respectivamente, es decir, un aumento del 35% y 43% (Acuña A, 2018).

Debido al comportamiento que se obtuvo con los morteros de Cal hidratada y Cal apagada esta técnica no pudo aplicarse, no se recomienda puesto que no dará buenos resultados. Por otro lado, con el mortero especial de restauración Planitop HDM Restauro la técnica si es aplicable y se puede alcanzar una mejora en las propiedades mecánicas de los muretes de mampostería. A pesar de que con el Planitop se aumentó un poco la resistencia y rigidez del murete, este no fue un aumento sustancial que valga la pena, por lo tanto, esta técnica no es factible y tampoco se recomienda para llevar a cabo procesos de restauración en construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena. Tan solo un 11% de aumento en la resistencia no vale la pena para todo el proceso constructivo, mano de obra y costos que requiere esta técnica.

En cuanto a la correlación que deseaba encontrarse entre la velocidad de pulso del ensayo de ultrasonido y la resistencia mecánica de los muretes proveniente del ensayo de compresión simple, se puede decir que no existe una tendencia evidente, la nube de puntos que resultó de los ensayos sobre los muretes sin reforzar corresponden a datos muy dispersos, pero que a ciencia cierta representan solo un tipo resultado, en este caso a la resistencia de muretes hechos con las condiciones del presente estudio. Es posible que, si se realizan muretes con diferentes condiciones, variando las dosificaciones de agregados, el tipo de arena y de argamasa, al momento de hacer una nube de puntos similar, los resultados brinden una tendencia con la cual pueda determinarse por medio del ensayo de ultrasonido, la resistencia mecánica de las estructuras coloniales, en especial aquellas que no pueden tocarse por ser patrimonio histórico de la humanidad.



7. RECOMENDACIONES

Una inquietud importante que surgió en la presente investigación, teniendo en cuenta que los morteros a base de Cal van a presentar una disminución de su resistencia mecánica por la adición de fibras ¿qué puede hacerse para obtener morteros hechos a base de Cal que desarrollen una alta resistencia mecánica?, porque si se desea adicionar fibras de cualquier tipo (ya sean microfibras o macrofibras) que tomen las cargas de tensión que sufra el mortero, es imprescindible que este último tenga una alta resistencia, básicamente porque el mortero de refuerzo que desea aplicarse en la mampostería colonial no debe tener una menor capacidad de carga que los muros de mampostería a reforzar.

Complementando lo anterior y luego de haber desarrollado parcialmente la presente investigación, se observó que la variable más importante y de la que aún no se tiene mucha información es la manera adecuada de hacer morteros a base de Cal que sean semejantes a los fabricados en la época de la colonia, en las investigaciones anteriores que sirvieron como base del presente estudio, los muretes que se venían desarrollando estaban hechos con morteros a base de Cal hidratada y no con cal apagada. Ahora surge la duda de cuál sería el comportamiento de estos morteros si se construyen con este último material, no sólo de que pasaría si se fabrican los morteros sino, cuál es el procedimiento óptimo para hacer estos morteros, por lo tanto, se recomienda estudiar diferentes propiedades de la Cal viva y su proceso de apagado, entre estos se puede mencionar:

- Analizar las fuentes de material (piedra caliza) existentes y determinar qué tanta pureza tienen en su composición de CaO con el objetivo de obtener cales con mayor calidad
- Estudiar cómo influye el tiempo de apagado de la cal viva en las propiedades mecánicas de los morteros hechos con este material
- Conocer con qué tipo de arena se puede obtener un mortero a base de Cal hecho con mejor calidad y características mecánicas
- Encontrar una proporción óptima de cal apagada:arena con la que se obtengan mejores resultados en los ensayos realizados sobre el mortero.
- Cómo es el comportamiento mecánico de los muretes cuando se construyen con morteros de pega hechos a base de Cal apagada

Además de analizar las propiedades de la Cal apagada y los morteros hechos con esta, también es importante estudiar a nivel local cuál es el efecto que genera la adición de diferentes tipos de fibras a los morteros hechos a base de Cal. Saber cuál es el porcentaje óptimo que debe adicionarse al mortero con relación al tipo de fibra que se esté analizando.

En cuanto a los muretes es importante analizar qué sucede cuando estos se encuentran en estado saturado, como se sabe, el nivel freático en las casas del centro histórico está muy cercano a la superficie del suelo y es común observar la presencia de humedad por el efecto de ascenso capilar en los muros de las casas coloniales.





Así mismo, estudiar estos muretes con otras dosificaciones de agregados, aunque en las investigaciones anteriores y en la presente se utilizó para construir los muretes una proporción 1:2:4 (correspondiente a Argamasa: Piedra pómez + Caliza: ladrillo) es de gran interés estudiar qué sucede cuando se utilizan otras proporciones en los agregados pétreos y como varía el comportamiento estructural de dichos muretes.



Una vez que se realicen estos muretes con diferentes características (en cuanto a dosificación y tipo de mortero), se recomienda que se hagan las respectivas pruebas de ultrasonido y compresión simple para tratar de encontrar una tendencia entre los resultados, lo que se desea obtener es una ecuación o fórmula de correlación que describa cual es la capacidad de carga de un muro de mampostería colonial existente tan solo teniendo como base la velocidad de pulso que registra dicho muro en el ensayo de ultrasonido. Hasta el momento no es posible obtener una correlación real puesto que con los datos actuales no hay una muestra lo suficientemente representativa como para obtener dicha ecuación.





ANEXOS

Ensayo de contenido de humedad



 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 				
Autor	Alvaro Yepes Tapia		Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Piedra caliza			
Ensayo	Contenido de humedad: INV E-122-07			
Datos obtenidos	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso recipiente (g)	w (% humedad)
	2347,3	2333,8	58,7	3.17



 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 				
Autor	Alvaro Yepes Tapia		Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Ladrillo militar			
Ensayo	Contenido de humedad: INV E-122-07			
Datos obtenidos	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso recipiente (g)	w (% humedad)
	1896.6	1964.6	70.3	0.12



 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>					UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL					 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil				
Autor		Alvaro Yepes Tapia			Lugar		Universidad de Cartagena							
Descripción		Piedra pómez												
Ensayo		Contenido de humedad: INV E-122-07												
Datos obtenidos		Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		Peso recipiente (g)		w (% humedad)						
		1745.9		1795		66.1		0.98						



Ensayo de resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles



 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>					UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL					 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil				
Autor		Alvaro Yepes Tapia			Lugar		Universidad de Cartagena							
Descripción		Piedra caliza												
Ensayo		Resistencia al desgaste. INV-E-219-07												
Datos obtenidos		# de esferas		# de revoluciones		Pa (g)		Pb (g)		% desgaste				
		12		1000		10010		6005		40.0				



 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>					UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL					 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil				
Autor		Alvaro Yepes Tapia			Lugar		Universidad de Cartagena							
Descripción		Piedra pómez												
Ensayo		Resistencia al desgaste. INV-E-219-07												
Datos obtenidos		# de esferas		# de revoluciones		Pa (g)		Pb (g)		% desgaste				
		12		1000		10010		4105		59.0				



Ensayo de gravedad específica y absorción



 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>							UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL							 Facultad de Ingeniería <small>Programa de Ingeniería Civil</small>						
Autor			Alvaro Yepes Tapia			Lugar			Universidad de Cartagena											
Descripción			Piedra caliza																	
Ensayo			Gravedad específica y absorción. INV 223-07																	
Datos obtenidos			Peso S.S.S. (g)	Peso sum. (g)	Peso seco (g)	Peso tara (g)	Absorción (%)	G.S.												
			2440.4	1450.4	2506.1	170.2	4.47	2.36												



 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>							UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL							 Facultad de Ingeniería <small>Programa de Ingeniería Civil</small>						
Autor			Alvaro Yepes Tapia			Lugar			Universidad de Cartagena											
Descripción			Piedra caliza																	
Ensayo			Gravedad específica y absorción. INV 223-07																	
Datos obtenidos			Peso S.S.S. (g)	Peso sum. (g)	Peso seco (g)	Peso tara (g)	Absorción (%)	G.S.												
			2445.6	1344.5	2427	212.3	10.43	2.01												

 Universidad de Cartagena <small>Fundada en 1827</small>							UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL							 Facultad de Ingeniería <small>Programa de Ingeniería Civil</small>						
Autor			Alvaro Yepes Tapia			Lugar			Universidad de Cartagena											
Descripción			Piedra caliza																	
Ensayo			Gravedad específica y absorción. INV 223-07																	
Datos obtenidos			Peso S.S.S. (g)	Peso sum. (g)	Peso seco (g)	Peso tara (g)	Absorción (%)	G.S.												
			2577.3	1202.3	2448.1	188.3	14.05	1.64												







Resultados de ensayo de resistencia a la compresión del mortero



 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Mortero a base de Cal con 30% de cemento y adición de 0.06% de fibras		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Muestra	Carga máxima (KN)	Resistencia mecánica (Kg/cm ²)	
Cubo #1	3	12	
Cubo #2	3.1	12.4	
Cubo #3	2.95	11.8	
Promedio	3.02	12.1	

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Mortero a base de Cal con 30% de cemento y adición de 0.13% de fibras		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Muestra	Carga máxima (KN)	Resistencia mecánica (Kg/cm ²)	
Cubo #1	2.1	8.4	
Cubo #2	2.2	8.8	
Cubo #3	2	8	
Promedio	2.1	8.4	







 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Mortero a base de Cal con 30% de cemento y adición de 0.20% de fibras		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Muestra	Carga máxima (KN)	Resistencia mecánica (Kg/cm ²)	
Cubo #1	1.1	4.4	
Cubo #2	1.2	4.8	
Cubo #3	1	4	
Promedio	1.1	4.4	



 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Mortero a base de Cal con adición de 0.06% de fibras de polipropileno		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Muestra	Carga máxima (KN)	Resistencia mecánica (Kg/cm ²)	
Cubo #1	1.9	7.6	
Cubo #2	1.85	7.4	
Cubo #3	1.8	7.2	
Promedio	1.85	7.40	

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL 			
Autor	Alvaro Yepes Tapia	Lugar	Universidad de Cartagena
Descripción	Mortero a base de Cal con adición de 0.13% de fibras de polipropileno		
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07		
Muestra	Carga máxima (KN)	Resistencia mecánica (Kg/cm ²)	
Cubo #1	1.5	6	
Cubo #2	1.45	5.8	
Cubo #3	1.48	5.92	
Promedio	1.48	5.91	



 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA Facultad de Ingeniería Fundada en 1827				UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL				 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil			
Autor	Alvaro Yepes Tapia			Lugar	Universidad de Cartagena						
Descripción	Mortero a base de Cal con adición de 0.20% de fibras de polipropileno										
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07										
Muestra	Carga máxima (KN)			Resistencia mecánica (Kg/cm2)							
Cubo #1	0.9			3.6							
Cubo #2	0.8			3.2							
Cubo #3	0.85			3.4							
Promedio	0.85			3.40							

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA Facultad de Ingeniería Fundada en 1827				UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL				 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil			
Autor	Alvaro Yepes Tapia			Lugar	Universidad de Cartagena						
Descripción	Mortero a base de Cal hidratada										
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07										
Muestra	Carga máxima (KN)			Resistencia mecánica (Kg/cm2)							
Cubo #1	2.3			9.2							
Cubo #2	2.3			9.2							
Cubo #3	2.25			9							
Promedio	2.28			9.1							

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA Facultad de Ingeniería Fundada en 1827				UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL				 Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Civil			
Autor	Alvaro Yepes Tapia			Lugar	Universidad de Cartagena						
Descripción	Mortero a base de Cal viva apagada										
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero. INV 323-07										
Muestra	Carga máxima (KN)			Resistencia mecánica (Kg/cm2)							
Cubo #1	2.4			9.6							
Cubo #2	2.4			9.6							
Cubo #3	2.4			9.6							
Promedio	2.40			9.6							



Ficha técnica producto Sika Fiber AD

CONSTRUYENDO CONFIANZA



HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

SikaFiber® AD

FIBRA DE POLIPROPILENO PARA EL REFUERZO DE CONCRETO Y MORTERO NO REDUCE EL ASENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

SikaFiber® AD es un refuerzo de fibra de polipropileno modificada que disminuye el agrietamiento de concretos y morteros.

SikaFiber® AD está compuesto por una mezcla de monofilamentos reticulados y enrollados y polímeros sintéticos que anulan la tendencia a reducir la trabajabilidad y el asentamiento del concreto, propia de otro tipo de fibras convencionales. Durante la mezcla, **SikaFiber® AD** se distribuye aleatoriamente dentro de la masa de concreto o mortero formando una red tridimensional muy uniforme.

USOS

- Losas de concreto (placas de piso, pavimentos, etc.)
- Mortero y concreto proyectados.
- Pañetes de fachada.
- Elementos prefabricados.
- Revestimientos de canales.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

La adición de **SikaFiber® AD** aporta las siguientes ventajas:

- Reducción de la fisuración por retracción e impidiendo su propagación.
- No modifica la trabajabilidad ni el asentamiento de la mezcla de concreto.
- Mejora la resistencia al impacto, reduciendo la fragilidad.
- La acción del **SikaFiber® AD** es de tipo físico y no afecta el proceso de hidratación del cemento.
- Aumenta la resistencia al fuego en concretos lanzados y convencionales.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Empaques	Bolsa hidrosoluble de 1 kg
Vida en el recipiente	Un (1) año desde la fecha de su producción.
Condiciones de Almacenamiento	Almacene el producto en su envase original en lugar fresco y bajo techo.
Densidad	Aprox. 0,91 kg/l
Dimensiones	19 mm
Punto de Fusión	160-170°C
Absorción de Agua	Ninguna.

Hoja de Datos del Producto
SikaFiber® AD
Diciembre 2017, Versión 01.02
02-14390-2109000008



Resistencia a tensión	300-350 kg/cm ²
Módulo de Elasticidad a Tensión	15.000 kg/cm ²
Resistencia a la Alcalinidad	Inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimentarios y ganaderos, aceites vegetales. No se pudre y es resistente a hongos y bacterias.
Elongación a Rotura	20-30 %

INSTRUCCIONES DE APLICACION

Se agrega en planta o a pie de obra directamente a la mezcla de concreto o mortero. No disolver en el agua de amasado. Una vez añadido el Sikafi ber AD basta con prolongar el mezclado al menos 5 minutos.

DOSIFICACIÓN

El SikaFiber® AD se empleará en dosificaciones de 1 kg/m³. Los concretos a los que se les ha agregado SikaFiber® AD cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C1116-95.

NOTAS

Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

RESTRICCIONES LOCALES

Este producto puede variar en su funcionamiento o aplicación como resultado de regulaciones locales específicas. Por favor, consulte la hoja técnica del país para la descripción exacta de los modos de aplicación y uso.

ECOLOGIA, SALUD Y SEGURIDAD

Manténgase fuera del alcance de los niños. Producto no tóxico ni corrosivo. Utilizar lentes de seguridad y mascarilla antipolvos durante su aplicación. Consultar la hoja de seguridad del producto.

NOTAS LEGALES

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos Sika, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de Sika sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todas las órdenes de compra son aceptadas con sujeción a nuestros términos de venta y despacho publicadas en la página web: col.sika.com.

Sika Colombia S.A.S

Vereda Casavita, Km 20.5 Autopista Norte
Tocancipá Cundinamarca Colombia
phone: +57 1 878 6233
e-mail: sika_colombia@co.sika.com
web: col.sika.com



SikaFiberAD_es_CO_12-2017_1_2.pdf

Hoja de Datos del Producto
SikaFiber® AD
Diciembre 2017, Versión 01.02
021408021000000008





Ficha técnica Planitop HDM Restauero

MAPEI

GP-CS IV
G-M15

CE EN 998-1
CE EN 998-2

Planitop HDM Restauero

Mortero premezclado bicomponente, de elevada ductilidad, a base de cal hidráulica natural (NHL) y Eco-Puzolana, de color claro, particularmente indicado para el refuerzo estructural "armado" de soportes de albañilería en combinación con Mapegrid G 120 y Mapegrid G 220 o Mapegrid B 250, y para la regularización de superficies de piedra, ladrillo y tufo

CAMPOS DE APLICACIÓN

Enfoscado de regularización de superficies de piedra, ladrillo y tufo.

Colocación de la malla **Mapegrid G 120**, **Mapegrid G 220** y en fibra de basalto **Mapegrid B 250** para el refuerzo estructural "armado" de muros, bóvedas y elementos de albañilería.

Algunos ejemplos típicos de aplicación

- Refuerzo de muros, bóvedas y elementos de albañilería en general.
- Regularización y refuerzo de elementos estructurales de piedra, ladrillo y tufo.
- Colocación y enlucido de **Mapegrid G 120**, sistema para el refuerzo estructural "local" en casos de solicitaciones inducidas por la falta de homogeneidad del soporte.
- Colocación y enlucido de **Mapegrid G 220** o **Mapegrid B 250**, sistema para el refuerzo estructural "armado" en casos de solicitaciones inducidas por eventos sísmicos.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Planitop HDM Restauero es un mortero bicomponente premezclado, de color claro, compuesto por cal hidráulica (NHL) y Eco-Puzolana, arenas naturales, aditivos especiales y polímeros sintéticos en dispersión acuosa, según una fórmula desarrollada en los Laboratorios de Investigación de MAPEI. Mezclando los dos componentes (polvo, componente A, y líquido, componente B), se obtiene una mezcla dócil que se puede aplicar sobre superficies verticales en un espesor no superior a 10 mm por capa.

Planitop HDM Restauero, gracias a su alto contenido de resina sintética en dispersión acuosa, posee

un elevado poder de adherencia y, después de su endurecimiento, se obtiene una capa compacta y tenaz, impermeable al agua y a los gases agresivos de la atmósfera pero permeable al vapor de agua.

Planitop HDM Restauero se clasifica, según la norma europea EN 998-2, como mortero de albañilería de tipo M15 y según la EN 998-1 como mortero de tipo GP categoría CS IV, al alcanzar una resistencia mecánica a compresión > 15 N/mm² (EN 1015-11) aun siendo un mortero compuesto por cal y Eco-Puzolana.

AVISOS IMPORTANTES

- No aplicar **Planitop HDM Restauero** con una temperatura inferior a +5°C.
- No añadir cemento, áridos o agua a **Planitop HDM Restauero**.

MODO DE APLICACIÓN

Preparación del soporte

Para asegurar al sistema una buena adherencia, se debe prestar una particular atención a la preparación del soporte, que debe ser sólido y estar perfectamente limpio y exento de partes friables, polvo, aceites y viejas pinturas. Para este propósito puede ser muy adecuado un enarenado o un enérgico lavado con agua a presión a fin de eliminar eventuales eflorescencias y sales solubles presentes en la albañilería. Proceder, a continuación, al lavado de la estructura con agua. Cuando la aplicación deba efectuarse sobre soportes de albañilería, piedra o tufo a reparar, se recomienda emplear **Mape-Antique Strutturale NHL**.

Preparación del mortero

La preparación de **Planitop HDM Restauero** debe efectuarse, según la aplicación elegida, con agitador

Planitop HDM Restauro



Aplicación con llana de la primera capa de Planitop HDM Restauro en el extradós de una bóveda



Colocación de la malla de fibra de vidrio resistente a los álcalis Mapegrid G 220



Aplicación con llana de la segunda capa de Planitop HDM Restauro en el extradós de una bóveda, cubriendo de forma homogénea la malla Mapegrid G 220

o en hormigonera de vaso en el caso de grandes cantidades (para la aplicación manual), o en una mezcladora de morteros de revoco (para la aplicación a máquina). En caso de aplicación manual, verter el componente B (líquido) en un recipiente limpio adecuado y añadir lentamente, bajo agitación mecánica, el componente A (polvo). Mezclar cuidadosamente Planitop HDM Restauro durante algunos minutos, cuidando de que el polvo adherido en las paredes y en el fondo del recipiente quede también disperso. El mezclado deberá prolongarse hasta conseguir una completa homogeneidad de la pasta (ausencia total de grumos); para esta operación es muy útil el uso de un agitador mecánico, a bajo número de revoluciones para evitar un exceso de oclusión de aire. Cuando el mortero se aplique por proyección, es necesario emplear una máquina revocadora discontinua, con mezcladora separada.

Aplicación del mortero cuando se utiliza para la colocación de Mapegrid G 120 o Mapegrid G 220

1. Aplicar Planitop HDM Restauro con una llana metálica (o con máquina revocadora), una capa uniforme de unos 4-5 mm.
2. Sobre el producto todavía "fresco", insertar Mapegrid G 120 o Mapegrid G 220 comprimiéndola con una llana lisa, para adherirla perfectamente al mortero aplicado.
3. Aplicar una segunda capa uniforme de unos 4 mm de Planitop HDM Restauro, de modo que cubra completamente la malla.
4. Enlucir la superficie "fresca" del mortero con una llana lisa.

Las mallas adyacentes de Mapegrid G 120 o Mapegrid G 220, en los puntos de unión, se deberán solapar, tanto longitudinal como transversalmente, al menos 5 cm.

Eventual acabado del mortero

Después de la aplicación de Planitop HDM Restauro, cuando se desee un acabado fratasado, utilizar uno de los productos de enlucido de la gama MAPEI tipo Mape-Antique FC (morteros finos exentos de cemento, para el acabado fratasado de revocos deshumidificantes).

El eventual revestimiento protector puede efectuarse, una vez endurecido completamente el mortero de enlucido, con Elastocolor Pittura (pintura elástica protectora y decorativa a base de resinas acrílicas en dispersión acuosa) previa aplicación de Elastocolor Primer (fondo fijador con disolvente, de alta penetración) o mediante el empleo de productos de la línea Silexcolor, a base de silicatos o Silancolor, a base de resinas silicónicas. Todos los revestimientos están disponibles en una amplia gama de colores, obtenibles con el sistema tintométrico ColoMap®.

NORMAS A OBSERVAR DURANTE Y DESPUÉS DE LA PUESTA EN OBRA

- Ninguna precaución especial debe ser tomada con una temperatura en torno a +20°C.
- Después de la aplicación, Planitop HDM Restauro, en unas condiciones climáticas particularmente secas, calurosas o con

viento, debe curarse cuidadosamente y se aconseja proteger la superficie de la evaporación rápida del agua.

Limpieza

A causa de la elevada adhesión de Planitop HDM Restauro, incluso sobre el metal, se aconseja lavar las herramientas de trabajo con agua antes de que el mortero haya fraguado. Después del fraguado, la limpieza puede efectuarse solamente con medios mecánicos.

CONSUMO

1,9 kg/m² por mm de espesor.

PRESENTACIÓN

Unidad de 30 kg:
componente A: sacos de 25 kg;
componente B: bidones de 5 kg.

ALMACENAMIENTO

Planitop HDM Restauro componente A, en su envase original y en un ambiente seco, se conserva durante 12 meses.

El producto cumple con las condiciones del anexo XVII del Reglamento (CE) N° 1907/2006 (REACH), punto 47.

Planitop HDM Restauro componente B, se conserva durante 24 meses.

Conservar ambos componentes a una temperatura no inferior a +5°C.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN Y LA PUESTA EN OBRA

Planitop HDM Restauro componente A contiene ligantes hidráulicos especiales, que en contacto con el sudor u otros fluidos corporales pueden causar daños oculares.

Planitop HDM Restauro componente B no es considerado peligroso según las actuales normas sobre la clasificación de las mezclas. Se recomienda utilizar guantes y gafas de protección y tomar las precauciones habituales para la manipulación de productos químicos. En caso de contacto con los ojos y la piel lavar inmediata y abundantemente con agua y consultar a un médico.

Para una mayor y más completa información en referencia al uso seguro de nuestros productos se recomienda consultar la última versión de la Ficha de Seguridad.

PRODUCTO PARA USO PROFESIONAL

ADVERTENCIA

Las indicaciones y las prescripciones arriba descritas, aún correspondiendo a nuestra mejor experiencia, deben considerarse, en cualquier caso, puramente indicativas y deberán confirmarse mediante aplicaciones prácticas concluyentes; por lo tanto, antes de emplear el producto, quien vaya a utilizarlo deberá determinar si es apropiado o no para el uso previsto y asumirá toda la responsabilidad que pudiera derivar de su uso.

Hacer referencia a la versión actualizada de la ficha técnica, disponible en la web www.mapei.com

Las referencias relativas a este producto están disponibles bajo solicitud y en la web de Mapei www.mapei.es y www.mapei.com

DATOS TÉCNICOS (valores característicos)

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO

Componente A

Consistencia:	polvo
Color:	claro
Densidad aparente (kg/m ³):	1.400
Dimensión máxima del árido (mm) (EN 1015-1):	1,5
Contenido de iones cloruro (EN 1015-17) (%):	< 0,05

Componente B

Consistencia:	líquido fluido
Color:	blanco
Densidad (kg/m ³):	1,02
Residuo sólido (%):	10
Contenido de iones cloruros (EN 1015-17) (%):	< 0,05

DATOS DE APLICACIÓN

Proporción de la mezcla:	1 saco de 25 kg de componente A con 1 bidón de componente B
Consistencia de la mezcla:	fluida-espatulable
Densidad de la mezcla (EN 1015-6) (kg/m ³):	1.900
Espesor de aplicación (mm):	de 3 a 10 mm por capa
Temperatura de aplicación permitida:	de +5°C a +35°C
Duración de la mezcla:	aprox. 1 h
Tiempo de fraguado (inicial-final):	10 h / 20 h

PRESTACIONES FINALES

Características de prestaciones	Método de prueba	Requisitos según la EN 990-1	Requisitos según la EN 990-2	Prestaciones del producto
Resistencia a compresión a 28 días (N/mm ²):	EN 1015-11	CS I (de 0,4 a 2,5)	de Clase M 1 (> 1 N/mm ²) a Clase M d (> 25 N/mm ²)	> 15 (Categoría CS IV) (Clase M 15)
		CS II (de 1,5 a 5,0)		
		CS III (de 3,5 a 7,5)		
		CS IV (> 6)		
Adhesión al soporte (adriello) (N/mm ²):	EN 1015-12	valor declarado de rotura (FP)	no requerido	> 0,8 Modo de rotura (FP) = A
Resistencia inicial a cortante (f _{ci}) (N/mm ²):	EN 1052-3	no requerido	valor tabulado	0,15
Módulo elástico a compresión (GPa):	EN 13412	no requerido	no requerido	8.000
Absorción de agua por capilaridad [kg/m ² ·min ^{-0,5}]:	EN 1015-18	de categoría W 0 a categoría W 2	valor declarado	categoría W 2 < 0,2
Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ):	EN 1015-19	valor declarado	valor tabulado	< 60
Conductividad térmica (λ _{0,040}) (W/m·K):	EN 1745	valor tabulado	0,75	P - 50°C
Reacción al fuego Euroclase:	EN 13501-1	valor declarado por el fabricante	valor declarado por el fabricante	Clase E



Mezcla finalizada de Planitop HDM Resauro



Aplicación por proyección de Planitop HDM Resauro sobre una pared de albanilería



Aplicación del sistema Planitop HDM Resauro y Mapegrid G 220 sobre una pared de albanilería

Planitop HDM Restauero



MEMORIA DESCRIPTIVA

Regularización de superficies de piedra, ladrillo o tufo y refuerzo estructural "armado" de paramentos, bóvedas y elementos de albañilería, mediante aplicación de un mortero premezclado bicomponente de elevada ductilidad, de color claro, compuesto por cal hidráulica (NHL) y Eco-Puzolana, aditivado con látex, fibrorreforzado (tipo **Planitop HDM Restauero** de MAPEI) en un espesor de 3-10 mm por capa. En el caso que **Planitop HDM Restauero** se utilice como refuerzo estructural, aplicar el mortero en combinación con una malla de fibra de vidrio especial, resistente a los álcalis (A.R.), aprestada, (tipo **Mapegrid B250, Mapegrid G 120 o Mapegrid G 220** de MAPEI).

Clasificación del material:

- mortero de albañilería tipo G categoría M15;
- mortero de revoque tipo GP categoría CS IV.

Características del material:

Densidad de la mezcla (EN 1015-6) (kg/m ³):	1.900
Espesor de aplicación (mm):	de 3 a 10 mm por capa
Temperatura de aplicación permitida:	de +5°C a +35°C
Duración de la mezcla:	prox. 1 hora (a +20°C)
Resistencia a compresión a 28 días (EN 1015-11) (N/mm ²):	≥ 15
Resistencia a cortante inicial (N/mm ²):	≥ 0,15 (valor tabulado)
Módulo elástico a compresión (GPa):	8.000
Adhesión al soporte de albañilería, a 28 días (EN 1015-12) (N/mm ²):	> 0,8



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña Caro, A. (2018). *Análisis comparativo de resistencia a compresión en muros de mampostería, por medio del uso de fibras de carbono y basalto para procesos de restauración y conservación*. Universidad de Cartagena, Colombia.
- Aguirre Castellar, L., & Arrieta Torres, A. (2014). *Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena*. Universidad de Cartagena, Colombia.
- Alvarez, J. (2014). *Empleo de aditivos para mejora de las propiedades de los morteros de cal*. Universidad de Navarra, España.
- 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.
- Asprone, D., Cadoni, E., Iucolano, F., & Prota, A. (2014). *Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar*. Cement and Concrete Composites, 53, 52–58.
- Aulet, A., Domenech, L., Romay, C., & Cetrangolo, G. (2016). *Estudios morfológicos y físico-mecánicos de morteros de cal del patrimonio arquitectónico*. (May). Congreso Euro-Americano REHABEND. Burgos, España.
- Berrocal Olave, A. (2018). *Evaluación patológica de la vulnerabilidad sísmica y efectos del oleaje en el fuerte-batería de San José y San Fernando de Bocachica*. Universidad de Granada, España.
- Berrocal Olave, A. (2016). *Estudio técnico: Batería San José de Bocachica en Cartagena de Indias, Colombia*. Quiroga, (9), 24–35.
- Bustos-García, A., Moreno-Fernández, E., González-Yunta, F., & Cobo-Escamilla, A. (2018). *Influencia de la adición de fibras en las propiedades de los morteros de cal hidráulica*. Dyna (Spain), 94(2), 228–232.
- Cabrera Cruz, A. R. (2017). *El patrimonio arquitectónico y fortificaciones en Cartagena de Indias: Identidad, significado cultural y prospectiva*. Universidad de Granada, España.
- Camargo Bocanegra, A., & Gamarra Torres, J. (2016). *Comparación de resistencias a la compresión entre mampostería colonial mixta presente en edificaciones y*



fortificaciones del centro histórico de Cartagena de Indias, y muretes fabricados bajo criterios de construcción semejantes. Universidad de Cartagena, Colombia.

Cuevas Mercado A. & Herrera Corrales C. (2013). *Propiedades mecánicas de la mampostería colonial de edificaciones en la ciudad de Cartagena de Indias.* Universidad de Cartagena, Colombia.

Durán Ruiz, L. (2016). *Mejoras estructurales obtenidas en morteros y hormigones de base cal hidráulica mediante la aportación de corcho y fibras de polipropileno para su aplicación en el refuerzo de estructuras históricas.* Universidad de Extremadura, España.

España Moratto, J. & Tapia de oro, E. (2008). *Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipología colonial.* Universidad de Cartagena, Colombia.

España Moratto, J. F., Puello Mendoza, E. J., & Almanza Vásquez, E. E. (2009). *Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias.* Revista Educación en Ingeniería 142–154.

Fernández Torres, G., & Palencia Cantillo, S. (2014). *Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de tierra bomba para comprobar su uso en la construcción de las murallas de Cartagena de Indias y compararlo con el utilizado actualmente en su restauración, proveniente de la cantera “Coloncito” en Turbaco.* Universidad de Cartagena, Colombia.

Gamarra Atencia J. & Martínez Domínguez I. (2011). *Resistencia de la mampostería de tipología colonial, cascoteo, en las estructuras de la ciudad de Cartagena de Indias.* Universidad de Cartagena, Colombia.

Guizbert Aguilar, J., Mateos Royo, ignacio, & Somovilla de Miguel, I. (2015). *Morteros De Restauración.* Revista Zabaglia.

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.

Izaguirre, A., Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2011). *Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars.* Construction and Building Materials, 25(2), 992–1000.

Liguori, B., Caputo, D., & Iucolano, F. (2015). *Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition.* Construction and Building Materials, 77, 455–460.



- Luque, A., Sebastián, E., De la Torre, M., Gultrone, G., Ruiz, E., Urosevic, M. (2006). Estudio comparativo de morteros de cal en pasta y en polvo. Control de la carbonatación. *MACLA*, 293–296. Dpto. de mineralogía y petrología. Universidad de Granada.
- Martínez, W.; Alonso, E.; Rubio, J.; Bedolla, J. A.; Velasco, F.; Torres, A. (2008). Comportamiento mecánico de morteros de Cal apagada artesanalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos coloniales. *Revista de La Construcción*, Vol. 7, Pag. 93-101.
- Mesa Giraldo, J. (2017). *Caracterización mecánica de la fibra polimérica para reforzar concreto “polifibra” de Polyaltec LTDA*. Fundación universidad de América, Colombia.
- Meza Flórez & Cohen Rhenals (2011). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales más utilizados y disponibles en la región para la restauración de las fortificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena*. Universidad de Cartagena, Colombia.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Diario Oficial, 444.
- Přinosil, M., & Kabele, P. (2016). *Mechanical Properties of Fiber Reinforced Lime-Based Mortars Evaluated from Four-Point Bending Test*. *Applied Mechanics and Materials*, 821, 526–531.
- Solís R., Moreno E., C. W. (2004). *Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados*. 2, 41–52.
- Terán Bonilla, J. A. (2004). *Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica*. *Conserva*, 8, 101–122.
- Ministerio de Cultura. (2018). *Plan especial de manejo y protección (PEMP) Murallas y castillo de San Felipe*. *DTS: documento técnico de soporte*.
- Trejbal, J. (2018). *Mechanical properties of lime-based mortars reinforced with plasma treated glass fibers*. *Construction and Building Materials*, 190(February), 929–938.
- TRICAT. (2008). El uso de la cal en la conservación del patrimonio edificado. *Taller Internacional de Conservación y Restauración de Arquitectura de Tierra*.



Yepes Madrid, G. I. (2018). *Patrimonio de Cartagena de Indias: finales del XIX a los años treinta del XX*. Facultad de Historia y Artes. Universidad de Granada, España.
Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/52441>

Žižlavský, T., Vyšvařil, M., & Rovnaníková, P. (2018). *Characterization of aerial lime-based mortars with addition of biopolymers*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 379(1), 0–7.

Zuleta J, L., & Jaramillo G, L. (2006). *Cartagena de Indias, impacto económico de la zona histórica* (1st ed., Vol. 53; Convenio Andrés bello, Ed.). Bogotá.