



ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE MURETES DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR Y REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA PARA USO EN EDIFICACIONES COLONIALES EN PROCESOS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL.



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE MURETES  
DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR Y REFORZADOS CON MALLA  
ELECTROSOLDADA PARA USO EN EDIFICACIONES COLONIALES EN  
PROCESOS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL.**



**JULY PAULINE DEVOZ DÍAZ**

**LAURA CRISTINA TERÁN SIMANCAS**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA D.T.Y.C.**

**2020**



ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE MURETES DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR Y REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA PARA USO EN EDIFICACIONES COLONIALES EN PROCESOS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL.

Investigadores:

July Pauline Devoz Díaz

Laura Cristina Terán Simancas

Propuesta de grado para optar el título de:

INGENIERO CIVIL

Grupo de investigación:

ESCONPAT

Línea de investigación:

CONSERVACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LOS MONUMENTOS

Investigador director:

ARNOLDO BERROCAL OLAVE

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA D.T.Y.C.



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director

**ARNOLDO BERROCAL OLAVE**

Firma del jurado

**RAMÓN TORRES ORTEGA**

Firma del jurado

**WALBERTO RIVERA**



## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Dios y la Santísima Virgen María, sin ellos no hubiese sido posible obtener este sueño de manera satisfactoria.

Nuestros padres Germán, Victoria, Cristina y Víctor, por su entrega y apoyo en todo momento.

Ing. Arnoldo Berrocal Olave y su empresa, por ser pieza clave y fundamental en el desarrollo de esta investigación, brindándonos tiempo, asesoría y conocimiento en el momento en que lo necesitamos.

Ing. Andrés Camargo Bocanegra, por su pasión por la investigación y acompañarnos desde el primer momento hasta el fin de este proyecto.

Ing. Modesto Barrios, por permitir el uso de su laboratorio para realizar los ensayos necesarios.

Ing. Rafael Madrid, por su acompañamiento en todo este tiempo de nuestra formación profesional, por quien sentimos un profundo aprecio.

Mapei Colombia S.A.S, especialmente al Ing. Carlos Pallares quien permitió la obtención de los materiales necesarios para llevar a cabo la investigación y la asesoría para el uso de estos.

A la Universidad de Cartagena, quien nos proporcionó una formación integral como Ingenieras Civiles para servirle a la ciudad de Cartagena, la región Caribe y el país.



## DEDICATORIAS

A Dios y la Virgen María, que fueron mi compañía en los días de soledad, mi sustento y mi ayuda para insistir, persistir y resistir a pesar de la distancia con mi familia y poder obtener hoy un logro más para mi proyecto de vida y el cielo.

A mis padres, Cristina y Víctor, por su formación, en valores, que me permitió llevar siempre de manera exitosa mi pregrado, por su apoyo incondicional, por su voto de confianza y por procurar siempre lo mejor para mí.

A Luciana, Jerónimo, Cesar y Mónica, por animarme, por estar pendiente de mí, por nunca dudar de mis capacidades y por ese amor que en cada llamada y mensaje me transmitían. Por esperarme siempre en casa con los brazos abiertos y una sonrisa reconfortante.

A Ana y Gaby, quienes siempre me esperaban con el mismo amor y cariño de madre y hermana de cuando aún vivía con ellas.

A Felipe, mi compañero, por siempre llenarme de amor, palabras de aliento y positivismo, por ayudarme a ser mejor estudiante y mejor persona, por su apoyo y acompañamiento incondicional en estos últimos años.

Laura Cristina

A Dios, por ser mi guía en todo este proceso de aprendizaje tanto personal como intelectual, brindándome la sabiduría necesaria para enfrentar todos los obstáculos interpuestos a lo largo del camino para al final culminar una etapa más en mi vida.

A mis padres, Victoria y German, por ser mi apoyo incondicional en todo momento, por brindarme ese cariño especial, motivarme a seguir a delante y superarme cada día más.

A mis hermanos, Jeimmy y Kevin, por su compañía, apoyo y siempre confiar en mis capacidades.

A mis compañeros y amigos, que siempre estuvieron presente en todo el proceso, con los cuales aprendí, reí y lloré, mostrando su colaboración desinteresada en todo momento.

July Devoz



## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ANEXOS .....	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT .....	16
INTRODUCCIÓN .....	18
1. MARCO DE REFERENCIA.....	21
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	21
1.2 ANTECEDENTES.....	31
1.3 MARCO TEÓRICO .....	37
1.3.1 Materiales de construcción de las fortificaciones y edificaciones de la ciudad de Cartagena de Indias.....	37
1.4 MAMPOSTERÍA SIMPLE.....	41
1.4.1 Comportamiento mecánico de los muros de mampostería simple .....	41
1.5 ENSAYOS DE MATERIALES.....	44
1.5.1 Ensayo Destructivo (Determinación de la resistencia de la mampostería a la compresión) 44	
1.5.2 Ensayo no destructivo (ultrasonido).....	45
1.6 NORMATIVIDAD DE LA MALLA ELECTRO-SOLDADA .....	46
2. OBJETIVOS .....	48
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	48
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	48
3. ALCANCE.....	49
4. METODOLOGÍA.....	52



4.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN: MIXTA .....	52
4.2	TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	52
4.2.1	Información secundaria .....	52
4.2.2	Información primaria.....	53
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	70
5.1	Análisis de resultados ensayo de resistencia al desgaste.....	70
5.2	Análisis de resultados ensayo de humedad .....	71
5.3	Análisis de resultado ensayo de gravedad especifica absorción de los agregados 73	
5.4	Análisis de resultado ensayo de consistencia normal.....	74
5.5	Análisis de resultado ensayo tiempo de fraguado .....	76
5.6	Análisis de resultado ensayo de compresión del mortero .....	77
5.7	Análisis de resultados ensayo de ultrasonido.....	80
5.8	Resultado y análisis de ensayo de compresión simple a muretes no reforzados.	83
5.9	Relación entre ensayo de ultrasonido y de compresión simple.....	88
5.10	Gráficas esfuerzo – deformación muretes no reforzados .....	91
5.11	Resultado y análisis de ensayo de compresión simple a muretes reforzados..	98
5.12	Gráficas esfuerzo – deformación muretes reforzados .....	104
6.	CONCLUSIONES .....	111
7.	RECOMENDACIONES.....	114
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	116



## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.Reparacion de las piezas más dañadas y malla con recubrimiento en mortero. .....	23
Ilustración 2.Perforación de muretes para colocación de anclajes.....	27
Ilustración 3.Aplicación del salpicado al murete. Fuente:(Bacca Sanchez & Claro Lazaro, 2012).....	27
Ilustración 4.Ensayo de resistencia a la compresión y módulo elástico a murete de unidad y media.....	30
Ilustración 5. Fisuración del revoque en murete, reforzados con malla electro-soldada. .	30
Ilustración 6. Fallas típicas de la mampostería. ....	42
Ilustración 7. Fallas generadas por la mampostería. ....	44
Ilustración 8. Muestra de roca coralina dispuesta en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.....	55
Ilustración 9.Muestra de roca coralina luego de ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.....	55
Ilustración 10. Muestra de roca coralina que paso el tamiz No 12. Fuente: Autores.....	55
Ilustración 11. Muestra de roca caliza dispuesta en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.....	55
Ilustración 12. Muestra de roca caliza luego de ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.....	55
Ilustración 13. Muestra de roca caliza que paso el tamiz No 12. Fuente: Autores. ....	55
Ilustración 14. Muestra de roca caliza, coralina y ladrillo militar sometido a ensayo de humedad.....	56
Ilustración 15.Muestras de roca coral y ladrillo militar saturadas. Fuente: Autores.....	57
Ilustración 16.Muestra de roca caliza saturada, sumergida. Fuente: Autores. ....	58
Ilustración 17.Homogenización de muestra de cal con determinado porcentaje de agua. Fuente: Autores. ....	59
Ilustración 18.Disposicion de la pasta sobre molde en aparato de Vicat. Fuente: Autores. .....	59



Ilustración 19. Ensayo de tiempo de fraguado a muestra de cal. Fuente: Autores. ....	60
Ilustración 20. Muestra luego de las diferentes lecturas tomadas. ....	60
Ilustración 21. Elaboración de cubos para ensayo de resistencia al mortero. Fuente: Autores. ....	61
Ilustración 22. Cubos de mortero en proporciones 1:2 de cal y arena (argamasa). ....	61
Ilustración 23. Elaboración de muretes de mampostería colonial tipo I. Fuente: Autores. ....	62
Ilustración 24. Ensayo de ultrasonido sobre muretes de concreto colonial. ....	63
Ilustración 25. Mallas electro-soldadas de 4mm cada 15 y taladro percutor empleado para hacer las perforaciones en los muros. ....	64
Ilustración 26. Epóxico empleado en las perforaciones e instalación de la malla con sus anclajes. ....	65
Ilustración 27. Preparación de mortero de recubrimiento a emplear en la mampostería. .	66
Ilustración 28: Aplicación de mortero de recubrimiento en murete. ....	66
Ilustración 29. Ensayo de compresión en murete. ....	67
Ilustración 30. Pesado de murete en laboratorio previo al ensayo. ....	67
Ilustración 31. Ensayo de compresión a cubo de mortero de cal y arena. ....	77
Ilustración 32. Cubo de mortero de cal y arena luego de ser ensayado. ....	78
Ilustración 33. Falla típica de muretes ensayados a la compresión sin reforzar. ....	84
Ilustración 34. Falla muretes reforzados con anclaje y estado luego de ser bajado de la máquina universal. Fuente: Autores. ....	98



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factor de corrección por esbeltez para $f'm$ , .....	45
Tabla 2. Granulometrías de la muestra para ensayo. ....	54
Tabla 3. Carga abrasiva.....	54
Tabla 4 Masa mínima de material húmedo seleccionada para prueba de contenido de agua. .....	56
Tabla 5. Porcentaje de desgaste para la roca caliza y coralina.....	70
Tabla 6. Ensayo de humedad INV-E-122-07 .....	72
Tabla 7. Resultados ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados. ....	73
Tabla 8. Consistencia normal de la cal.....	75
Tabla 9. Ensayo tiempo de fraguado de la cal. ....	76
Tabla 10. Ensayo de Resistencia a la compresión en cubos de mortero a los 7,14 y 28 días. .....	78
Tabla 11. Resultados de ensayo de ultrasonido a muretes. ....	80
Tabla 12. Resumen resultados de ensayo de ultrasonido. ....	81
Tabla 13. Clasificación del concreto de acuerdo a su velocidad ultrasónica en m/s. ....	82
Tabla 14. Análisis estadístico t student. ....	83
Tabla 15. Resultados ensayo Resistencia a la compresión de muretes de mampostería colonial tipo I no reforzados. ....	85
Tabla 16. Cálculo de Resistencia promedio para los muretes no reforzados. ....	86
Tabla 17. Cuadro comparativo de resultados. ....	88
Tabla 18. Resultados ensayo de ultrasonido y de compresión simple para muretes no reforzados.....	90
Tabla 19. Módulo de elasticidad de muretes N-03, N-04, N-05, N-07, N-09.....	97
Tabla 20. Resultados de Resistencia a la compresión en muretes reforzados con malla electro-soldada. ....	100
Tabla 21. Matriz de resumen resultados de investigación. ....	102
Tabla 22. Módulo de elasticidad de muretes reforzados con malla electro-soldada.....	109



## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Evolución de la resistencia a la compresión de morteros. ....	29
Gráfica 2. Resultado Resistencia al desgaste. ....	71
Gráfica 3. Resultado ensayo de humedad. ....	72
Gráfica 4. Resultado ensayo de absorción de agregados. ....	74
Gráfica 5. Resistencia a compresión del mortero de cal a los 7,14 y 28 días. ....	79
Gráfica 6. Velocidad vs resistencia.....	90
Gráfica 7. Correlación entre resultados de velocidades de onda en m/s y Resistencia en Mpa en hoja de cálculo .....	91
Gráfica 8. Esfuerzo/deformación. Murete N-03 .....	92
Gráfica 9. Esfuerzo/deformación. Murete N-04 .....	92
Gráfica 10. Esfuerzo/deformación. Murete N-05 .....	93
Gráfica 11. Esfuerzo/deformación. Murete N-07 .....	93
Gráfica 12. Esfuerzo/deformación. Murete N-09 .....	93
Gráfica 13. Esfuerzo/Deformación ajustadas polinómicamente. Muretes N-03, N-04, N-05, N-07, N-10. ....	94
Gráfica 14. Determinación del módulo de elasticidad murete N-03.....	95
Gráfica 15. Determinación del módulo de elasticidad murete N-04.....	95
Gráfica 16. Determinación del módulo de elasticidad murete N-05.....	95
Gráfica 17. Determinación del módulo de elasticidad murete N-07.....	96
Gráfica 18. Determinación del módulo de elasticidad murete N-09.....	96
Gráfica 19. Esfuerzo/deformación Murete E-04.....	104
Gráfica 20. Esfuerzo/deformación Murete E-06.....	105
Gráfica 21. Esfuerzo/deformación Murete E-08.....	105
Gráfica 22. Esfuerzo/deformación Murete E-09.....	105
Gráfica 23. Esfuerzo/deformación Murete E-10.....	106
Gráfica 24. Esfuerzo/Deformación ajustadas polinómicamente. Muretes E-04, E-06, E-08, E-09, E-10. ....	106
Gráfica 25. Determinación del módulo de elasticidad murete E-04. ....	107



Gráfica 26. Determinación del módulo de elasticidad murete E-06. ....	107
Gráfica 27. Determinación del módulo de elasticidad murete E-08. ....	108
Gráfica 28. Determinación del módulo de elasticidad murete E-09. ....	108
Gráfica 29. Determinación del módulo de elasticidad murete E-10. ....	108
Gráfica 30. Esfuerzo/deformación Murete E-01 .....	126
Gráfica 31. Esfuerzo/deformación Murete E-02 .....	126
Gráfica 32. Esfuerzo/deformación Murete E-03 .....	126
Gráfica 33. Esfuerzo/deformación Murete E-07 .....	127
Gráfica 34. Esfuerzo/deformación Murete E-05 .....	127



## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultado ensayos de humedad de los materiales .....	121
Anexo 2. Ecuación contenida de agua .....	121
Anexo 3. Resultado ensayo de gravedad específica y absorción de los materiales. ....	122
Anexo 4. Fórmulas gravedad específica .....	122
Anexo 5. Resultado ensayo de Resistencia al desgaste para roca caliza y pómez .....	123
Anexo 6. Ecuación Resistencia al desgaste.....	123
Anexo 7. Resultado ensayo de consistencia normal de la argamasa.....	123
Anexo 8. Ecuación para determinar el intervalo de confianza.....	124
Anexo 9. Gráficas esfuerzo – deformación para los muretes que no entran en el promedio. .....	124



## RESUMEN

La ciudad de Cartagena abarca un conjunto de estructuras patrimoniales que guardan un gran valor histórico, arquitectónico e ingenieril, estructuras que al transcurrir los años se ven en la necesidad de sufrir procesos de intervención y así otorgarles mayor durabilidad y estabilidad en el tiempo, razón por la que este proyecto de investigación tiene como objetivo determinar la factibilidad técnica para el uso de la malla electro-soldada como refuerzo para la mampostería colonial tipo 1, comparando la resistencia a la compresión, de muretes compuestos por argamasa, roca coralina, roca caliza y ladrillo militar, reforzados y no reforzados, resultante de ensayos destructivos y no destructivos, con el fin de implementarla en procesos de restauración y conservación de estructuras de valor histórico y patrimonial. Para el desarrollo de este objetivo fue necesario realizar una revisión bibliográfica minuciosa en donde se contextualizó el tema en estudio, seguidamente se efectuaron ensayos a los materiales constituyentes de la mampostería en estudio y a continuación se construyeron 20 especímenes (10 reforzados y 10 sin reforzar) para finalmente ser ensayados a la compresión obteniendo así una serie de datos completos tanto cualitativos como cuantitativos. Al realizar el ensayo a la compresión de los muretes sin reforzar, estos se caracterizaron por presentar una falla longitudinal en el mortero o argamasa a través de toda la sección rodeando los materiales constituyentes del espécimen, seguido del desprendimiento de los mismos en la parte superior del murete y lograron una resistencia promedio de 4.35 Kg/cm<sup>2</sup>. De igual manera, al realizar este mismo ensayo para muretes reforzados se observó un incremento en la resistencia a la compresión del 162.5%, es decir, que este tipo de refuerzo si le aporta capacidad de carga al murete y a su vez permite que este tenga un comportamiento dúctil que se



vio reflejado en las deformaciones y los esfuerzos presentados durante la prueba, por lo que es una opción viable a utilizar en estructuras patrimoniales para efectos de restauración.



## ABSTRACT

The city of Cartagena encompasses a set of heritage structures that have a great historical, architectural and engineering value, structures that over the years are in need of undergoing intervention processes and thus grant them greater durability and stability over time, which is why The objective of this research project is to determine the technical feasibility for the use of electro-welded mesh as reinforcement for type 1 colonial masonry, to compare compressive strength, mortars composed of mortar, coral rock, limestone rock and brick military, reinforced and non-reinforced, results of destructive and non-destructive tests, in order to implement in restoration and conservation processes of structures of historical and heritage value. For the development of this objective it was necessary to conduct a thorough bibliographic review where the subject under study was contextualized, then essays were analyzed on the materials constituting the masonry under study and then 20 specimens (10 reinforced and 10 without pressure) were constructed to finally to be tested for compression thus obtaining a series of complete qualitative and quantitative data. From the tests described above it was obtained that the setting time of the mortar composed of lime, sand and water is very slow, in relation to the average setting of the cement used in current constructions, it also happens with the normal consistency test that gave as 47.8% result because lime absorbs a greater amount of water than cement. When performing the compression test of the unreinforced walls, these were characterized by presenting a longitudinal failure in the mortar or mortar through the entire section surrounding the constituent materials of the specimen, followed by their detachment at the top of the murete and achieved an average resistance of 4.35 kg / cm<sup>2</sup>. Similarly, when performing this same test for reinforced walls, an increase in the compressive



strength of 162.5% was observed, that is, that this type of reinforcement does provide load capacity to the wall and in turn allows it to have a Ductile behavior that was reflected in the deformations and efforts presented during the test, making it a viable option to use in heritage structures for restoration purposes.



## INTRODUCCIÓN

Al norte del territorio colombiano se encuentra la ciudad de Cartagena de Indias, reconocida a nivel mundial por su ciudad amurallada, uno de los íconos más importantes, que dejaron los españoles después de la época de la colonia y conquista, que desde el año de 1984 es reconocido como patrimonio histórico de la humanidad por parte de la UNESCO (ICOMOS International Council on Monuments and Sites, 1984).

Las murallas, fortificaciones y edificaciones del centro histórico de la ciudad de Cartagena se han ido deteriorando a medida que pasa el tiempo como consecuencia de su antigüedad y otros factores como el medio ambiente salino y la acción del hombre moderno, es por esto que es necesario explorar diferentes técnicas de conservación de estas obras de ingeniería (Consuegra et al., n.d.).

Estas estructuras, fueron construidas haciendo uso de la mampostería colonial, que es un material heterogéneo, compuesto por piedra caliza, piedra coralina, argamasa, ladrillo militar o tolete, entre otros materiales y era utilizado comúnmente para las construcciones de la época (Cabrera, 2017). Con frecuencia, la mampostería fue empleada para la elaboración de muros de carga, en el caso de las murallas actuando como muro de contención, sometidos a fuerzas verticales que se presentan por el peso propio de la estructura; sin embargo, como los muros no se encontraban reforzados, se podían afectar fácilmente debido a la presión de tierra ocasionada por las corrientes de vientos o sismos.



Por este motivo, es necesario escrutar diferentes técnicas de reforzamiento de muros de mampostería colonial ya que permite alargar la vida útil de las edificaciones y fortificaciones antiguas además de conservar el patrimonio de la ciudad de Cartagena.

A nivel local, en los últimos años, estudiantes y docentes de la Universidad de Cartagena, han investigado acerca de los temas antes mencionados y han determinado los materiales más apropiados para la fabricación de la mampostería, teniendo en cuenta la disponibilidad en la zona, sus propiedades, cómo es la respuesta de la mampostería luego de ser sometida a esfuerzos de compresión entre otras características. Como es el caso de (Gamarra Atencia & Martínez Domínguez, 2011) quienes estudiaron la resistencia a la compresión de muretes de mampostería y los materiales que los conformaban y concluyeron que a medida que se aumenta el porcentaje de argamasa y disminuye el porcentaje de mezcla de agregados, la resistencia del ciclópeo es mayor.

A su vez, (Aguirre Castellar & Arrieta Torres, 2014a) estudiaron materiales como el ladrillo, la madera y el mortero y establecieron que la calidad de estos en los procesos de restauración de la edificación Obra Pía, en el centro histórico, no fue la más adecuada.

Por su parte, (Acuña, 2018) buscó analizar el comportamiento de muretes de mampostería colonial tipo I, reforzados con fibras de carbono y basalto. Luego de ser sometidos a pruebas de carga concluyó que bajo las mismas condiciones y sometidos a esfuerzos de compresión, los muros presentan un mayor aumento de resistencias reforzados con BFRP.

El presente estudio, se enfocó en los muros de mampostería tipo I del centro histórico de la ciudad de Cartagena, los cuales están definidos como “una mezcla ciclópea compuesta de argamasa, que a su vez se encuentra compuesta de arena y cal, más pedazos de arena burda y



fragmentos de teja o ladrillo en proporciones 1:2:4 respectivamente” (Acuña, 2018) y tuvo como objetivo determinar por medio de ensayos destructivos y no destructivos como el de compresión simple y el de ultrasonido si es factible realizar el reforzamiento de este tipo de muros mediante la aplicación de malla electro-soldada.

Esta forma de reforzamiento resulta útil ya que lleva una metodología poco invasiva que permite aumentar la resistencia de los muros a las cargas laterales (Ruiz Garcia & Alcocer Martinez, 1998), además que ha sido utilizada en el medio por su facilidad de aplicación y es considerablemente económica (Flores, Rios, & Reyes Salinas, 2004).

Para el cumplimiento de los objetivos trazados primeramente se realizó una revisión bibliográfica del tema planteado, identificando los antecedentes que servirían de base en el desarrollo de la investigación, seguidamente se identificó los materiales necesarios a emplear que se asemejaran a los empleados en la época colonial para recrear la mampostería en estudio. Para finalmente elaborar los especímenes e implementar el tipo de refuerzo propuesto y aplicarles el ensayo de compresión, actuando como factor determinante en la decisión de cuan efectivo es este tipo de refuerzo para esta mampostería. La fase experimental de esta investigación tuvo lugar en la ciudad de Cartagena de Indias en el laboratorio de suelos de la universidad de Cartagena y en el laboratorio de la empresa GEOCONSULTAS LTDA.

Este trabajo de grado está enfocado en la línea de conservación y consolidación de los monumentos dentro del grupo de investigación de Estructuras, Construcción y Patrimonio ESCONPAT de la Universidad de Cartagena debido a que busca examinar una técnica de refuerzo de muros coloniales, que al ser usada efectivamente contribuye a la prolongación de la vida útil de las edificaciones que conforman el patrimonio de la ciudad de Cartagena de Indias.



## 1. MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 ESTADO DEL ARTE

La mampostería en una estructura se puede ver sometida a diferentes esfuerzos, ya sean de compresión, cortante, tracción o flexo-compresión, dichos esfuerzos pueden ser producto de las cargas de la estructura en sí o por perturbaciones externas. Con el fin de contribuir al mantenimiento de la integridad de la mampostería en una estructura, se han generado una gran variedad de sistemas de refuerzo para la misma como son: el remplazo de muros no estructurales o muros con aberturas por muros estructurales, el revestimiento estructural con fibras compuestas, la costura de grietas con barras de refuerzo, el sistema de refuerzo por medio de cables, el confinamiento de muros con láminas de FCRP, el sistema de refuerzo con correas de acero y plásticas y el confinamiento de muros con malla electro-soldada o pañete armado, entre otros sistemas. El conocimiento de las características de estos sistemas es fundamental a la hora de optar por uno u otro para aplicarlo en una estructura, lo que ha conllevado a desarrollar estudios a lo largo del tiempo dando a conocer el aporte de los mismos a la mampostería. En esta ocasión se analizará el sistema de refuerzo en muros con malla electro-soldada encaminado a reforzar estructuras de valor histórico y a continuación se presentan una serie de investigaciones donde aplican este sistema con características particulares, del mismo modo se darán a conocer investigaciones que brinden un conocimiento adicional sobre el tipo de mampostería que se quiere reforzar con este sistema.



- **(Tejeda Jacome & Silva Echartea, 2002) Estudio de resistencias a compresión diagonal (cortante), de muretes de mampostería fabricados con materiales de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez.**

En este trabajo se presentaron los resultados de un estudio experimental para determinar la resistencia a compresión diagonal de muretes de tabiques de barro recocido y tabicones de concreto, que son los materiales que más se utilizan en la construcción de vivienda para la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez. Asimismo, con el objeto de buscar normalizar el uso de la malla electro-soldada en el refuerzo de muros confinados elaborados con estos materiales, se ensayó el mismo tipo de murete reforzado con malla y recubrimiento de mortero, siguiendo la metodología de Norma Mexicana propuesta por el CENAPRED para el primer caso. Los tabiques de barro recocido tuvieron una dimensión promedio nominal de 5x13x27 y los tabicones de 9x13x28; los muretes que se fabricaron tuvieron una dimensión promedio de 43x43 centímetros y se construyeron tres por cada distribuidor previamente seleccionado.

Los muretes elaborados fueron ensayados a los 28 días, se obtuvieron valores promedio de resistencia de los muretes fabricados con ladrillos de barro recocido normales; es decir, sin refuerzo de malla y mortero, de 3.91 Kg/cm<sup>2</sup> y para los mismos tipos de muro, pero reforzados con malla electro-soldada y recubrimiento de mortero fue de 13.20 Kg/cm<sup>2</sup>. En el caso de los muretes fabricados con tabicones de cemento cal y arena normal, la resistencia media fue de 4.93 Kg/cm<sup>2</sup> y los reforzados con malla electro-soldada y recubrimiento de mortero, la resistencia media fue de 9.52 Kg/cm<sup>2</sup>. En los resultados de las pruebas se observó un mayor nivel de resistencia y rigidez, y un patrón de agrietamiento más uniforme en los muretes reforzados.



- **(Flores et al., 2004) Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas.**

La investigación se centra en la aplicación de la técnica de refuerzo con malla y mortero, verificando en particular el comportamiento de muros con aberturas. Los especímenes usados en este estudio fueron previamente ensayados ante cargas laterales cíclicas y fueron llevados a un nivel de daño severo, con agrietamientos en la mampostería de más de 10 mm y fueron construidos con mampostería de piezas macizas de arcilla recocida. En el refuerzo de los muros se usó malla con denominación 6×6-10/10, la cual señalan en la investigación que es la de mayor uso en la construcción. Esta malla tiene alambres calibre 10 (3.43 mm de diámetro), separados 150 mm (6 plg). El mortero, tanto de pega como el usado en el recubrimiento fue elaborado con cemento, cal y arena en proporción volumétrica 1: ¼:3.75.



*Ilustración 1. Reparación de las piezas más dañadas y malla con recubrimiento en mortero.  
Fuente: (Flores et al., 2004).*

Se identificaron tres etapas para describir el comportamiento del muro: una etapa aproximadamente elástica lineal hasta el primer agrietamiento; una etapa plástica con pérdida de rigidez, incremento en el agrietamiento, e incremento en la resistencia hasta llegar a la carga



máxima; y la etapa de falla que en este caso se presentó súbitamente al fracturarse los alambres de la malla.

En el modelo MV-1R se consideró que la etapa inicial, en que el modelo se comportó aproximadamente de manera elástica lineal, concluyó en la distorsión 0.00105 y la carga 137 kN (14 t) con grietas de 1.5 mm de ancho en el punto de carga máxima que se cerraron a 0.4 mm de ancho al descargar. Fueron aplicados en total doce ciclos de carga, mientras se producían nuevos agrietamientos inclinados distribuidos en el muro. Previa a la falla del muro el espesor de grietas no sobrepasó los 2 mm. La carga máxima se presentó para una distorsión de 0.0062 mm/mm y una carga de 294 kN (30 t). En el caso del modelo MV-2R los primeros agrietamientos inclinados, después de la etapa elástica, se presentaron en una distorsión de 0.00069 mm/mm y una carga de 108 kN (11.02 t), la carga máxima se presentó a una distorsión de 0.0061 mm/mm y una carga de 265 kN (27.02 t). Para esta distorsión las grietas se abrían hasta 2 mm en el pico, pero al descargar se cerraban a 0.1 mm. En este espécimen no ocurrió falla súbita, sin embargo, sí se comenzaron a fracturar varios alambres de la malla al llegar a la distorsión de 0.008.

De la investigación concluyeron que la técnica de rehabilitación utilizada, mediante el uso de malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero proporcionó un aumento muy considerable de rigidez, resistencia, así como capacidad de deformación, no obstante que, una vez llegada a la distorsión de fractura de los alambres, la carga cayó súbitamente. Los modelos rehabilitados alcanzaron, en promedio, tres veces la resistencia de los muros originales.



- **(Yañez & Mendoza, 2011) Comportamiento de la mampostería sometida a esfuerzos cortantes, reforzada con mallas metálicas y recubrimientos de mortero.**

La investigación tuvo como objetivo estudiar 3 tipos de malla: malla electro-soldada (ME), multimalla ferretera (MM) y tela de gallinero (TG), las cuales tenían diferentes tamaños de aberturas y cuantías; además de estudiar tres tipos de mortero de recubrimiento (tipo I, II, III). A partir de estas variables fueron elaborados muretes de 70x70 cm. Las mallas se fijaron a los muretes por medio de clavos de acero para madera de 2.5'' y se recubrieron con aproximadamente 2cm de mortero, posteriormente se ensayaron en diagonal obteniendo valores de esfuerzo cortante entre 0.709Mpa—1.008Mpa y posteriormente mediante la gráfica esfuerzo cortante-deformación angular de cada espécimen, obtuvieron módulos de rigidez a cortante entre 2154.38Mpa—3605.1Mpa. De los resultados obtenidos se observó que el simple hecho de colocar recubrimiento incrementa la resistencia al esfuerzo cortante, y al colocar mallas de refuerzo se lograron incrementos de hasta 20%, principalmente para especímenes recubiertos con mortero tipo I y II. Adicionalmente se observó que cualquier tipo de refuerzo es adecuado, y no se recomienda el uso de mortero tipo III como recubrimiento, por otro lado, concluyeron que la abertura de la malla también influye en la adherencia del mortero de recubrimiento con el murete y por ende en la resistencia a esfuerzo contante y plantean que no se recomienda usar mallas con separaciones muy pequeñas o inferiores a 5 cm.



- **(Bacca Sanchez & Claro Lazaro, 2012) Resistencia de la mampostería reforzada exteriormente usando malla electro-soldada con fines de reforzamiento en viviendas de la ciudad de Ocaña.**

Esta investigación se realizó con el fin de evaluar las propiedades físico-mecánicas de las unidades de mampostería producidas por 5 fabricantes en la ciudad de Ocaña. Las propiedades evaluadas fueron resistencia a la compresión, tasa inicial de absorción, absorción 24 horas, módulo de rotura, alabeo, y propiedades de piezas de mampostería en conjunto con el mortero de pega tales como la resistencia a la compresión de prismas de mampostería, la resistencia a tracción diagonal, el módulo de elasticidad y de rigidez o corte de muros reforzados y no reforzados exteriormente usando malla electro-soldada por una cara. Esta última como una medida para disminuir la vulnerabilidad sísmica a que está sujeta una vivienda principalmente.

La mampostería que se estudio fue elaborada con ladrillos cocidos de arcilla y un mortero a base de cemento, en total se elaboraron 29 muretes con ladrillos de 5 fabricantes de la ciudad, los muretes están formados por 15 hiladas de ladrillo pre-humedecido y juntas de mortero de 1 cm de espesor. Se reforzaron 19 muretes y para ello se utilizó malla electro-soldada de 150x150x3.5x3.5 mm y sección de 1.16 m de ancho por 1.16m de longitud



*Ilustración 2. Perforación de muretes para colocación de anclajes.*

*Fuente: (Bacca Sanchez & Claro Lazaro, 2012).*



*Ilustración 3. Aplicación del salpicado al murete.*

*Fuente: (Bacca Sanchez & Claro Lazaro, 2012)*

Los resultados del ensayo de tracción diagonal arrojaron que el módulo de rigidez para los muretes no reforzados en promedio fue de 562.49 MPa y con refuerzo fue de 1047.74 MPa, por otro lado, el esfuerzo cortante obtenido fue en promedio de 340.68 MPa para los muretes no reforzados y 551.54 MPa para los reforzados.

En la investigación se concluyó que el sistema de refuerzo además de incrementar significativamente el módulo de elasticidad longitudinal, el módulo de rigidez (incremento del 86% en general de muretes reforzados en relación con los no reforzados) y la resistencia al esfuerzo cortante de los muretes reforzados (incremento del 62%), contribuyo a un comportamiento más dúctil, mantuvo la integridad estructural, no permitió la separación de piezas y ayudo a que la falla se presentara de una manera menos explosiva con respecto a los muretes no reforzados, esto minimiza la afectación de vidas humanas y aminora las pérdidas materiales que puedan presentarse ante un evento sísmico.



- **(Morales, 2018) Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas.**

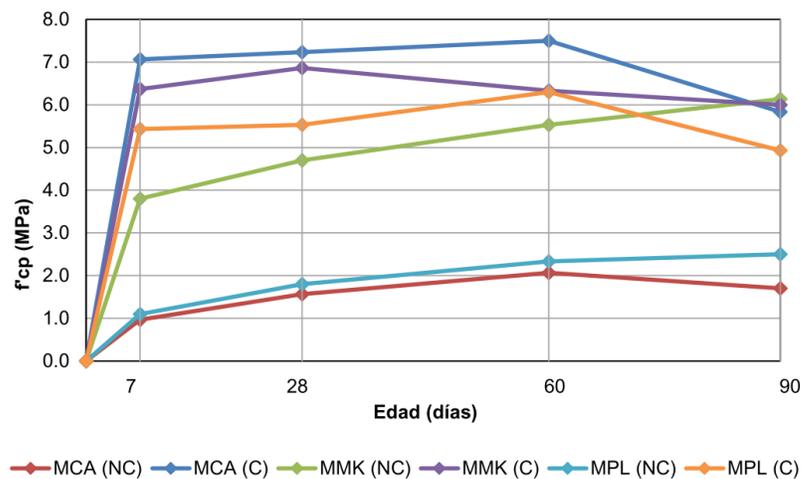
La investigación busco presentar la caracterización de mezclas de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y la evaluación de su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida. También planteo el uso de dos sistemas de reforzamiento, poco invasivos, que buscaban mejorar el comportamiento mecánico de la mampostería.

Para el desarrollo de la metodología experimental, inicialmente se fabricaron setenta y dos cubos de morteros de cal y arena, de los cuales algunos se encontraban adicionados con metacaolín o polvo de ladrillo. Del mismo modo, la mitad de las muestras fueron sometidas a un proceso de carbonatación acelerada, para simular un proceso de envejecimiento en las mezclas, debido a que este tipo de morteros aumenta su resistencia a medida que se carbonata con el CO<sub>2</sub> presente en el ambiente. Al mismo tiempo, se ejecutaron ensayos de carbonatación acelerada, en nueve muestras cilíndricas de mortero, con el objetivo de determinar la constante de carbonatación de dichas mezclas. Con los resultados obtenidos, se seleccionó el mortero que presentara una resistencia similar a la encontrada en morteros patrimoniales, y con éste, se construyeron muestras de mampostería. Se construyeron tres tipos de muestras de mampostería: muretes de unidad y media de mampostería, medianos y grandes. Para las juntas de los muretes, se utilizó el mortero de cal y arena, adicionado con metacaolín, con proporciones cal: arena: metacaolín de 1:3:0.2. Adicionalmente, también se empleó mortero de cal y arena, con una dosificación cal: arena de 1:3, en muretes de unidad y media.



Los morteros analizados fueron de cal y arena (MCA), adicionados con metacaolín (MMK) y polvo de ladrillo (MPL). Se realizaron ensayos de resistencias a compresión a siete, veintiocho, sesenta y noventa días, para los morteros carbonatados (C) y no carbonatados (NC), los resultados del comportamiento de los morteros se observan en la Gráfica 1.

De la Gráfica 1 se observa que, a los noventa días, el mortero adicionado con metacaolín no carbonatado presentó la mayor resistencia. Además, su tasa de endurecimiento fue superior a la de las otras mezclas, por lo que la dosificación adicionada propuesta por los autores resultaría útil para rehabilitaciones de edificaciones históricas. Por consiguiente, dicha mezcla se seleccionó para la construcción de los muretes de mampostería del estudio.

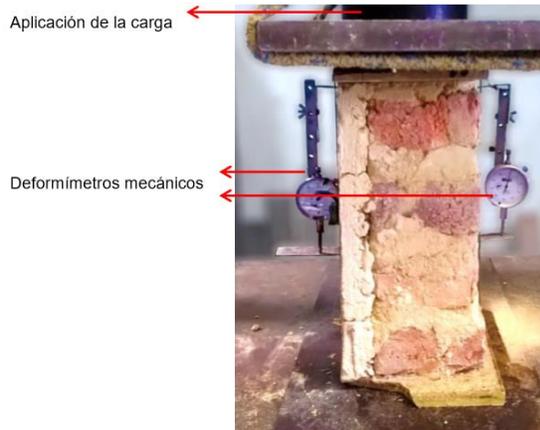


Gráfica 1. Evolución de la resistencia a la compresión de morteros.  
Fuente: (Morales, 2018).

Para el reforzamiento de la mampostería se utilizaron dos metodologías: reforzamiento con malla electro-soldada calibre 0.5 cm, de 15 x 15 cm embebida en mortero de cal y arena, y reforzamiento con barras de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer por sus siglas en inglés) embebidas en las juntas del sistema. Para los muretes de unidad y media, las resistencias a



compresión promedio registradas fueron: 2.9 MPa en elementos construidos con mortero de cal no carbonatados (MCA-1.5U-NC), 4.2 MPa en carbonatados (MCA-1.5U-C), 3.2 MPa en ejemplares elaborados con mortero adicionado con metacaolín, no reforzados (M-1.5-U-NR), 4.6 MPa en reforzados con malla electro-soldada (M-1.5-U-ME) y 6.7 MPa con barras de GFRP (M-1.5U-BFRP). En los muretes medianos no reforzados, la resistencia a compresión promedio fue de 3.6 MPa, mientras que en los elementos reforzados con malla electro-soldada y barras de GFRP fueron de 3.4 MPa, y 3.7 MPa, respectivamente. Los muretes grandes fueron sometidos a ensayo de compresión diagonal, en los muretes no reforzados, el esfuerzo cortante promedio en el área neta fue de 0.1038 MPa con una dispersión de 16%. Para el caso de los especímenes reforzados con malla electro-soldada y barras de GFRP, se registraron valores de 0.1048 MPa y 0.1082 MPa.



*Ilustración 4. Ensayo de resistencia a la compresión y módulo elástico a murete de unidad y media.  
Fuente: (Morales, 2018).*



*Ilustración 5. Fisuración del revoque en murete, reforzados con malla electro-soldada.  
Fuente: (Morales, 2018).*



## 1.2 ANTECEDENTES

A nivel local no se han adelantado investigaciones donde evalúen la respuesta de la mampostería colonial tipo I ante reforzamiento con malla electro soldada, sin embargo, el tipo de mampostería antes mencionada ha sido objeto de estudio a lo largo de los últimos años por parte de estudiantes y docentes de la universidad de Cartagena en sus trabajos de grado, donde han determinado cuales serían los materiales más apropiados para su elaboración teniendo en cuenta los disponibles en la zona, sus propiedades , como es la respuesta de la mampostería luego de ser sometida a esfuerzos de compresión entre otras características. En el ámbito de reforzamiento externo de este tipo de mampostería, solo se destaca una investigación reciente desarrollada en el campo de la ingeniería por Ayda Acuña dirigida por el ingeniero Arnoldo Berrocal donde plantean un refuerzo con fibra de dos tipos, lo que da a entender que aún existe un abanico de posibilidades por explorar para el conocimiento de esta mampostería.

- **(Gamarra Atencia & Martínez Dominguez, 2011) Resistencia estructural de la mampostería de tipología colonial, cascoteo, en las estructuras de la ciudad de Cartagena de Indias.**

Con el fin de obtener conocimiento sobre la mampostería de tipología colonia "cascoteo" presente en diferentes edificaciones coloniales del Centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias, se realizaron ensayos destructivos para determinar la resistencia a la compresión tanto de los muretes como de los materiales que los componen.

Los materiales empleados para la elaboración de los muretes fueron extraídos de una casa del centro histórico que se encontraba en proceso de restauración. Se elaboraron 45 muretes de



0.25x0.25x0.25 con diferentes porcentajes de argamasa, ladrillo, piedra caliza y piedra coral y se ensayaron bajo parámetros de la norma NTC 673 a los 7, 14 y 28 días para determinar su resistencia a la compresión. Obtuvieron valores de resistencia entre 7.61 kg/cm<sup>2</sup> y 56.11 kg/cm<sup>2</sup>. Concluyeron que a medida que se aumenta el porcentaje de argamasa y disminuye el porcentaje de mezcla de agregados, la resistencia del cíclopeo es mayor.

**(Aguirre Castellar & Arrieta Torres, 2014b) 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.**

Esta investigación tuvo como fin 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 la de los materiales originales, con el fin de contribuir a que la ciudad conserve el título de Patrimonio Histórico de la Humanidad. Puntualmente los materiales objeto de estudio fueron el ladrillo, la madera y el mortero. Los materiales antiguos estudiados fueron provenientes de la edificación Obra Pía, ubicada en el centro histórico.

De los resultados obtenidos los autores concluyeron que los ladrillos de la ferretería Antioquia y la Ladrillera Bayunca no son los más adecuados para la restauración, pues estos no cuentan con las mejores propiedades físicas y mecánicas con respecto a los ladrillos de Obra Pía; en resistencia a la compresión el ladrillo de Obra Pía presentó 41,1Kg/cm<sup>2</sup>, en comparación con el ladrillo de la ferretería Antioquia que presentó menor resistencia, hay una diferencia de 45,79% con un valor de 22,3 Kg/cm<sup>2</sup>.



Los resultados con respecto a la madera, reflejan que la madera de Yadira Paternina y Maderas Carrillo presentan mejores resultados que la madera encontrada en Obra Pía, y como lo mencionan los autores, deja en evidencia que la madera de Obra Pía posiblemente no conservaba sus propiedades físicas y mecánicas, debido a su gran antigüedad y estar expuesta a la intemperie.

Por otro lado, para las muestras de mortero utilizaron Cal Nare y Cal distribuida por la Ferretería Antioquia en proporciones 1:2:1 de cal, arena y cemento, los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días reflejaron que la Cal Nare presenta una resistencia de 73,5 Kg/cm<sup>2</sup> y la Cal de la Ferretería Antioquia difiere de ésta en un 22% con un valor de 57,1 Kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se concluyeron que la cal Nare es la más apropiada para su uso en procesos de restauración.

- **(Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 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.**

Partiendo de una afirmación realizada por Rodolfo Segovia en su libro titulado “Fortificaciones de Cartagena de Indias” donde menciona que “los monumentos históricos de la ciudad de Cartagena fueron construidos con materiales obtenidos de canteras cercanas”, los autores de la presente investigación se interesaron en comparar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de tierra bomba con los materiales constitutivos de las murallas de Cartagena de Indias y comprobar su uso en la construcción de las mismas y a su vez realizar la comparación con el utilizado actualmente en su restauración, proveniente de la cantera “Coloncito” en Turbaco.



Para el desarrollo de la investigación se evaluaron las propiedades del material rocoso de la cantera de tierra Bomba con los presentes en tres zonas de la muralla y a su vez con los presentes en la cantera de Coloncito. Dentro de los resultados que obtuvieron en la investigación encontraron que el material extraído de canteras 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 kg/cm<sup>2</sup> y porcentaje de desgaste del 33,70 %. La diferencia porcentual entre densidades es de 1,43% y 0,25% para la porosidad total. El material de Coloncito coincide con la zona 2, (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago), con diferencias porcentuales de densidades de 1,75%, resistencia a la compresión 6,99% y porosidad total de 1,75%. Los resultados confirman la utilización del material de la isla de tierra bomba en la construcción de las murallas de Cartagena y avala la utilización del material de coloncito para obras de restauración.

- **(Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 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**

En esta investigación se abordó el comportamiento de uno de los tipos de mampostería colonial presente en el centro histórico de Cartagena como lo es la tipo I , tuvo como fin comparar la resistencia a la compresión entre la mampostería mixta de tipo colonial presente en edificaciones y fortificaciones del centro histórico de Cartagena, y muretes fabricados bajo técnicas antiguas de construcción, por medio de ensayos destructivos y no destructivos, con el fin de establecer nuevos criterios técnicos en la realización de intervenciones para la restauración del patrimonio. Se



realizaron ensayos de ultrasonido y destructivos a 9 muretes, divididos en tres grupos, el primer grupo compuesto por muretes fabricados con materiales obtenidos de canteras actuales, el segundo compuesto por muretes fabricados con materiales antiguos rescatados de los restos de las muestras extraídas y el tercero por muretes originales extraídos de una casa colonial en el centro histórico, cada grupo contaba con 3 muretes.

Los resultados promedio de ultrasonido para el grupo de muretes 1,2 y 3 fue de 93.97 kg-f/cm<sup>2</sup>, 106.43 kg-f/cm<sup>2</sup> y 75.86 kg-f/cm<sup>2</sup> respectivamente, por otro lado, se obtuvieron como resultado de resistencia a la compresión en muretes valores promedios de 4.46 kg-f/cm<sup>2</sup>, 10.98 kg-f/cm<sup>2</sup> y 6.26 kg-f/cm<sup>2</sup>.

Como conclusión se planteó en la investigación, que al ser la argamasa el elemento que determinó las fallas en todas las muestras, este tipo de morteros se debe preparar con la mejor cal que se pueda obtener. Sin embargo, cuando compararon las resistencias promedio obtenidas de los muretes elaborados con agregados de origen actual (4,46 *Kgf/cm<sup>2</sup>*), la resultante de los hechos con materiales de origen antiguo (10,98 *Kgf/cm<sup>2</sup>*) y los originales extraídos (6,26 *Kgf/cm<sup>2</sup>*), afirmaron que el mortero colonial mixto elaborado con materiales que se usan actualmente en intervenciones al patrimonio no es el adecuado para obtener la resistencia que en la actualidad presenta la “debilitada” mampostería original que se encuentra en el centro histórico de Cartagena y no garantiza una armonía o continuidad en la propiedades originales de este tipo de legados.



- **(Acuña, 2018) 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.**

A través de esta investigación se buscó analizar el comportamiento de muretes de mampostería colonial tipo I, reforzados con fibras de carbono y basalto luego de ser sometidos a pruebas de carga para plantear la posibilidad de utilización de un tipo de fibra en procesos de restauración y conservación de estructuras de valor histórico y patrimonial. En la fase experimental de la investigación se realizaron ensayos físicos a los materiales constituyentes de la mampostería como son; ensayo de resistencia al desgaste, humedad, absorción, gravedad específica y resistencia del mortero o argamasa, estos resultados contribuyeron al análisis final de los datos obtenidos luego de ensayar los muretes.

Se elaboraron 9 muretes de los cuales, 3 se ensayaron destructivamente sin ser reforzados, 3 se ensayaron reforzados con CFRP y 3 reforzados con BFRP, lográndose resistencias finales iguales a 3,69 kg/cm<sup>2</sup> 4,98 kg/cm<sup>2</sup> y 5,29 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Debido a esto, la investigación concluyo que bajo las mismas condiciones y sometidos a esfuerzos de compresión, los muros presentan un mayor aumento de resistencias reforzados con BFRP. La falla en todos los casos fue la misma, los materiales fallaron mucho antes que el material de refuerzo, no se presentó deslaminación del refuerzo y quien presidió la falla fue siempre el mortero, propiciando un desprendimiento total en los materiales, demarcado en la junta de unión.



## 1.3 MARCO TEÓRICO

### 1.3.1 Materiales de construcción de las fortificaciones y edificaciones de la ciudad de Cartagena de Indias.

Cartagena de Indias era una plaza fuerte en todo el virreinato, por tal razón era un gran centro de producción de materiales constructivos, basado en la industria de la piedra y los hornos de cal, donde la producción principalmente era dirigida a los fuertes que protegían la ciudad y luego a las iglesias y viviendas de los residentes. Por esta razón existen diferencias en la calidad de los agregados entre las obras civiles religiosas y las militares (Cabrera, 2017).

En las construcciones de la colonia, el subproducto principal en los elementos de albañilería como la mampostería fue la cal, y permitió que estas tuvieran una gran preponderancia reflejada en puntales, arcos, bóvedas, pañetes, cornisas y portadas. Debido a que contaba con una característica que permitía que, al exponerla al fuego, era susceptible de disolverse en el agua y producía una pasta fina y untuosa que, al mezclarse con arena, adquiría con el tiempo una dureza semejante a la de las piedras ordinarias. Por eso, las piedras calcáreas que producen la mejor cal son las más duras y más pesadas, su grano es más fino y compacto y su textura más homogénea (Cabrera, 2017).

Existen diferentes tipos de cal como lo son: la cal viva, la cal hidratada y la cal hidráulica. La primera se obtiene durante el proceso de la calcinación de la caliza ya que desprende dióxido de carbono y quedan los óxidos de calcio y magnesio. Luego, para obtener la cal hidratada se procede a apagar la cal, el cual es un procedimiento exotérmico que se da cuando la cal viva reacciona con suficiente agua por lo que se obtiene un polvo seco llamado cal hidratada, el cual es esencialmente hidróxido de calcio mezclado con óxido de magnesio y algo de hidróxido de



magnesio. Por último la cal hidráulica, es un producto usado para el cemento, calcinado y que endurece debajo del agua (Guerrero, 2001a).

Este importante subproducto proviene de las rocas calizas, las cuales son rocas constituidas por más del 50% de cristales de calcita, por lo que se les considera como roca monomineral. La calcita precipita, cuando disminuye el  $CO_2$  de las aguas del mar, lagos y ríos, por aumento de temperatura o por descenso de la presión, lo último debido a la agitación de las aguas marinas o a emersión de aguas subterráneas de zonas calcáreas. Esto explica, el por qué las provincias carbonatadas recientes se localizan entre los paralelos de los dos trópicos, cerca de las líneas de costa y en aguas someras con influencia de los rayos solares, así como la formación de travertinos por fuentes brotantes. De igual importancia a los factores de temperatura y presión en la formación de calizas, es el factor biológico, ya que la gran mayoría de los organismos marinos fijan en sus esqueletos o conchas, el  $CaCO_3$  y así se constituyen en un componente esencial de este grupo de rocas (Palacios Salinas, 2010).

A 8 Km de la ciudad de Cartagena se pueden encontrar alrededor de 75 millones de toneladas este tipo de piedras en las colinas de Albornoz horizontalmente sobre arcillas, a su vez, en Turbaco es posible encontrar 1450 millones de toneladas tomado como base un área de 58 km<sup>2</sup> (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016).

La caliza coralina, es de origen sedimentario, y puede formarse mecánicamente por la materia desmenuzada de conchas y arena de coral, que se cementan formando una caliza compacta. Normalmente estas se encuentran en aguas poco profundas o de profundidad moderada en el mar (Guerrero, 2001b). La textura de la roca está determinada por el tipo de coral, la matriz es de grano fino y las de color amarillo y rosado, son las más resistentes (Berrocal Olave, 2018a).



Históricamente los ladrillos, la caliza y la cal empleados en la construcción de las fortalezas eran explotados en zonas ubicadas en las laderas de la popa en la denominada cantera de Tesca, en la cantera de Tierra bomba en el sitio del Tejar de San Bernabé de los Jesuitas contigua a la plataforma de Santa Ángel, otra reserva explotada de esa época, era la hacienda Pua en Arroyo de Piedra y otra de menor reserva, pero con características especiales en su composición química, ubicadas en todo el perímetro de la Bahía de Cartagena. Estos materiales eran seleccionados minuciosamente por los ingenieros militares de la época (Cabrera, 2017)

Otro elemento utilizado para la fabricación del denominado concreto colonial era el ladrillo militar, el cual era un bloque de arcilla o cerámica cocido empleado en la construcción de muros y revestimientos decorativos. Estos, pueden ser secados al sol, pero acostumbran a secarse en hornos. Resisten a la humedad y el calor y pueden durar en algunos casos más que la piedra. Su color varía dependiendo de las arcillas empleadas y sus proporciones cambian de acuerdo a las tradiciones arquitectónicas (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016).

El ladrillo era conocido por los indígenas americanos prehispánicos, sin embargo, fue en España donde, por influencia musulmana, tuvo más apogeo (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 2014b). En la albañilería de la ciudad de Cartagena es posible encontrarlo en diferentes tamaños, comúnmente es llamado “tolete”, cuyas medidas se derivan de la vara castellana y que es llamado “ladrillo militar” por Juan Manuel Zapatero debido a su uso frecuente en fortificaciones de la ciudad. La unión de dichos bloques con mortero, formaban un sistema monolítico capaz de resistir reacciones producidas por la carga de gravedad (Berrocal Olave, 2018b). Mide 0,30 x 0,15 x 0,05 m y es de una calidad excelente en cuanto a la arcilla y cocción se refiere. Su color oscila entre el rojo vivo o bermellón y el almagra o almazarrón quemado; no descartando la existencia



de colores ocres y amarillos azufrados. Además del ladrillo militar se encuentran otros de diferente magnitud que usaron en construcciones domesticas en particular en muros y cubiertas de azotea (citado en Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016, pg 42).

El ladrillo no trabaja por si solo en la mampostería, sino que esta inmiscuido dentro de una matriz de argamasa, el cual es un mortero compuesto por una mezcla de arena, agua y cal que al secarse se solidifica, pero con una resistencia menor a la del hormigón. Esta mezcla, fue comúnmente usada hasta la aparición del cemento Portland en el siglo XIX. Fue utilizada en la época como pega para unir piedras y ladrillos en la construcción de muros de las viviendas, Iglesias y fortificaciones coloniales en la ciudad de Cartagena de Indias (Soto Osorio, 2015). La relación volumétrica más utilizada establece una parte de cal y dos partes de arena lavada de río (1:2). Las arenas utilizadas son las de río o quebrada, catalogadas como las mejores, las de mar había que lavarlas con dos o tres inviernos o con agua dulce (citado en Acuña, 2018, pág 37).

La unión, en aún dosificaciones desconocidas de los materiales mencionados anteriormente conforma el denominado concreto colonial, el cual es considerado un concreto semi-ciclópeo utilizado en las construcciones virreinales y en donde es fácil diferencial a simple vista las diferencias entre las proporciones (Berrocal Olave, 2018b).

Debido a que la composición del concreto es muy variada y de igual manera el origen de los materiales lo es, uno de los restauradores más importantes de la ciudad, Herrera Díaz, determinó que el concreto colonial está conformado por argamasa, piedra coralina, piedra pómez y pedazos de ladrillo en una dosificación aproximada de 1:2:4.



## **1.4 MAMPOSTERÍA SIMPLE**

Es un material compuesto, heterogéneo y anisótropo con componentes ordenadas periódicamente. Las propiedades mecánicas de la mampostería dependen de cada uno de los elementos que la componen y su disposición (Rougier, 2007a).

Normalmente, está compuesta por ladrillos adheridos con mortero, estas juntas se convierten en posibles planos de falla dando lugar a tres ejes principales de anisotropía, dos en planos de la mampostería y el tercero perpendicular a dicho plano (Rougier, 2007b).

Por último, el comportamiento estructural de la mampostería queda definido por características como la resistencia a la compresión, tracción y corte.

### **1.4.1 Comportamiento mecánico de los muros de mampostería simple**

Normalmente, en los muros de mampostería estructural la falla más común se presenta en muros con longitud/altura mayor o igual a 2. Según Lourenço y otros autores (Lourenço, 1998), el modo de falla de la mampostería depende principalmente del tipo de esfuerzos soportados. Si se presenta una pérdida de rigidez y resistencia rápida, la falla es de tipo frágil (esfuerzos cortantes y de tensión) y si la pérdida de rigidez y resistencia es gradual, la falla es de tipo dúctil (esfuerzos a compresión).

Según esto, la falla a compresión, la cual es una falla uniaxial, se presenta por aplastamiento, lo que se define como la reducción violenta del grosor de los mampuestos (deformación transversal) por medio de una fuerza aplicada hasta provocar la pérdida de su forma original, principalmente se presenta en el mortero (ocasionada por la interfaz) y puede generar fisuración vertical en las unidades donde los esfuerzos de compresión sean mayores a los máximos,



región donde generalmente se agrieta el muro y produce el colapso del mismo (Buelvas Moya, 2012a).

Normalmente, la capacidad de la mampostería para soportar cargas uniaxiales que se encuentran perpendicular a las juntas es buena. En este caso, la falla ocurre por agrietamiento vertical debido a que como el mortero y el ladrillo son diferentes materiales, de igual modo tienen diferentes módulos de Poisson (Rougier, 2007b).



*Ilustración 6. Fallas típicas de la mampostería.  
Fuente: (Buelvas Moya, 2012b).*

En algunos casos extremos, donde los materiales sean altamente resistentes y la relación de espesor del muro entre la altura de ladrillo es grande se puede dar una falla por deslizamiento a compresión (principalmente en la base del muro) (Acuña, 2018).



Cuando la mampostería está sometida a cargas laterales que generan esfuerzos cortantes, no se genera un estado de esfuerzos uniformes, lo que induce también a depender de la resistencia de la superficie de interfaz en diferentes partes del muro (Viviescas, 2009), lo que ocasiona la falla de la estructura por tensión diagonal o separación- agrietamiento de las juntas por la diagonal principal del muro. Esta se presenta por afectación de la fricción y la adherencia de las unidades con el mortero de pega, creando un aumento de esfuerzos cortantes en los planos de unión y por ende resultando en una separación de los materiales por estos en forma escalonada diagonal (misma propagación de la acción de la carga). En caso de presentarse la acción de tensión-cortante o flexo- cortante en la mampostería, la falla se puede presentar por agrietamiento cruzado en ambas diagonales del muro, mientras si el muro es esbelto, la falla se puede presentar por deslizamiento en la base (mayores efectos de la flexión). Los ensayos utilizados para la medición del cortante en la mampostería pueden ser por cargas laterales horizontales (estáticas y dinámicas) y por compresión diagonal (de resultados más conservadores de resistencia y deformaciones) (Acuña, 2018).

Formalmente la resistencia y la falla de la mampostería se determinan por la menor resistencia entre los mampuestos (unidades y mortero) y la unión mortero-unidades. La falla generalmente comienza por la interfaz de las juntas horizontales, pasando por una etapa inelástica hasta hacer fallar los ladrillos y los planos de unión de las juntas verticales, terminando con la pérdida de estabilidad global de la mampostería (Buelvas Moya, 2012b).

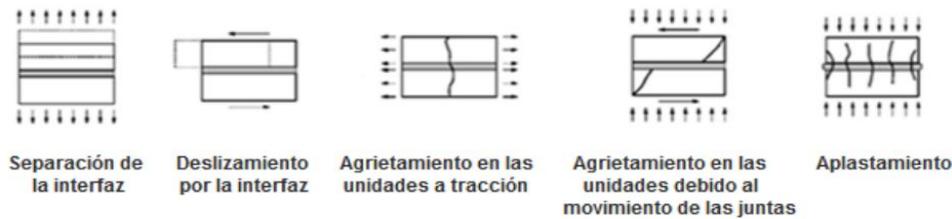


Ilustración 7. Fallas generadas por la mampostería.  
Fuente: (Buelvas Moya, 2012b).

## 1.5 ENSAYOS DE MATERIALES

### 1.5.1 Ensayo Destructivo (Determinación de la resistencia de la mampostería a la compresión)

El reglamento colombiano sismo resistente (NSR,2010) plantea que el valor especificado para la resistencia a la compresión de la mampostería  $f'_m$ , se determina de acuerdo a tres procedimientos como son: por medio de registros históricos, por determinación experimental sobre muretes de prueba o por medio de ensayos sobre materiales individuales.

Para la elaboración, refrentado y ensayo de los muretes que se utilicen para la determinación de  $f'_m$ , se deben llevar a cabo de acuerdo con la norma técnica Colombiana NTC 3495 y además se debe cumplir con ciertos requisitos.

El valor de  $f'_m$ , para una muestra debe ser el promedio obtenido del ensayo de 3 muretes de igual procedencia pero no debe ser mayor del 125 por ciento del menor valor obtenido en los ensayos. El valor de cada ensayo se obtiene de dividir la carga última obtenida por el área neta de la mampostería que tiene el murete ensayado.

Los muretes deben tener un mínimo de 30 cm de altura y una relación altura-ancho mayor o igual a 1.5 y menor o igual a 5. Los muretes de mampostería de bloque de perforación vertical



deben tener al menos el largo de una pieza completa. Los muretes de otros tipos deben tener al menos 10 cm de largo. El ancho y el tipo de construcción deben ser representativos del tipo de mampostería que se va a utilizar en la construcción.

El valor de  $f'_m$  debe corregirse multiplicándolo por el factor de corrección por esbeltez del murete dado en la Tabla 1.

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,2010).

### 1.5.2 Ensayo no destructivo (ultrasonido)

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del hormigón endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los destructivos.

Dentro del método de transmisión que es el más adecuado para hormigones, existen tres posiciones de colocación de los palpadores:

a) En caras opuestas (transmisión directa). Es el método más recomendable y el de mayor sensibilidad; b) En caras adyacentes (transmisión semidirecta); c) En la misma cara (transmisión superficial indirecta). Es el método menos sensible y se utiliza cuando es accesible una cara del hormigón. Puede aplicarse para determinar la profundidad de una grieta, siempre que no sea posible hacerlo por transmisión directa. (Huertes Fuertes, Rubio de Hita, & Rodriguez Liñan, 1993).



En los métodos a y b suelen utilizarse palpadores cilíndricos, sin embargo, para el método c, se pueden encontrar dificultades en la determinación exacta de la longitud del recorrido del sonido, por ello suelen utilizarse palpadores cónicos.

La velocidad de transmisión ó velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia ó separación L entre los transductores y el tiempo de transito t para esta distancia.

## 1.6 NORMATIVIDAD DE LA MALLA ELECTRO-SOLDADA

En el capítulo D.12 de la NSR-10 se exponen los requisitos del refuerzo para mampostería reforzada externamente. La cantidad de refuerzo dispuesta en los muros de mampostería reforzados externamente no pueden ser menor de los siguientes valores:

En cada lado del muro se debe colocar una malla electro-soldada que cumpla con las siguientes cuantías evaluadas con respecto al área bruta total del muro (incluye los espesores de mortero de revoque); Refuerzo vertical y horizontal mínimo de 0.00035. La separación tanto horizontal como vertical de los alambres de las mallas electro soldadas utilizadas como refuerzo no pueden ser mayor de 30 cm.

Las mallas de alambre electro-soldado se deberán anclar a la mampostería de tal manera que puedan alcanzar su resistencia a la fluencia especificada  $f_y$ . Si la malla se fija a la mampostería mediante conectores instalados a través de una carga explosiva de potencia controlada (tiro) o mediante clavos de acero, el número mínimo será de nueve por  $m^2$ . Los clavos y tiros deben tener un diámetro mínimo de 3mm; la cabeza del clavo o del tiro debe quedar salida del muro por lo menos 10mm.



Las mallas también se pueden anclar colocando conectores de barras o alambres de acero con diámetro mínimo de 4.5 mm, de tal manera que atraviesen el muro de mampostería y abracen con un gancho de 90° en cada extremo a las 2 mallas electro-soldadas; el número mínimo será de 4 por metro cuadrado.

Las mallas se deben amarrar a los conectores utilizando alambre galvanizado numero 16 (diámetro igual a 1.3 mm).

El refuerzo deberá ser continuo a lo largo y alto de los muros (disponiendo de los traslapes que sean necesarios) y deberá anclarse adecuadamente en la fundación de concreto reforzado cumpliendo las longitudes de desarrollo y los traslapes según se especifica en el titulo C se la NSR-10.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la factibilidad técnica para el uso de la malla electro-soldada como refuerzo para la mampostería colonial tipo 1, comparando la resistencia a la compresión, de muretes compuestos por argamasa, roca coralina, roca caliza y ladrillo militar, reforzados y no reforzados, resultante de ensayos destructivos y no destructivos, con el fin de implementarla en procesos de restauración y conservación de estructuras de valor histórico y patrimonial.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Analizar el comportamiento de los muretes, en cuanto a deformabilidad, patrón de fallas, luego de ser sometidos a ciertas condiciones de carga.
- Determinar las propiedades de los materiales constituyentes de la mampostería colonial tipo I, mediante ensayos físicos de los mismos, para identificar su aporte en el buen comportamiento de la mampostería a estudiar.
- Determinar los valores de resistencia a compresión de los muretes reforzados y sin reforzar, para analizar el incremento de este valor al aplicar la técnica de reforzamiento.
- Determinar el valor de la resistencia de los especímenes mediante un ensayo no destructivo de ultrasonido para establecer comparaciones entre estos y los valores de resistencia en el ensayo destructivo e identificar las ventajas y desventajas de la técnica de reforzamiento con malla electro-soldada en la mampostería colonial tipo I.



### 3. ALCANCE

La investigación está encaminada a determinar el comportamiento de la resistencia a la compresión, de la mampostería colonial tipo I compuesta por argamasa, piedra coralina y ladrillo militar, encontrada en diferentes edificaciones y fortificaciones del centro histórico de la ciudad de Cartagena, antes y después de ser reforzada con malla electro soldada, tomando como referencia los resultados del ensayo de compresión simple de muretes y ensayos no destructivos de ultrasonido aplicados en los mismos, para así establecer en que porcentaje aumenta este valor con el uso de esta técnica de refuerzo.

El desarrollo de la investigación tuvo lugar en el laboratorio de geotecnia de la universidad de Cartagena, el laboratorio del ingeniero Modesto Barrios y en Geoconsultas L.T.D.A teniendo en cuenta los equipos necesarios y disponibles para los diferentes ensayos a realizar.

La investigación fue llevada a cabo durante el segundo periodo académico del año 2019, abarcando alrededor de 5 meses, de los cuales una parte estuvo dedicada a la recopilación y organización de la información, otra parte constituyó el desarrollo experimental en donde se realizaron ensayos físicos a los materiales como son: ensayo de resistencia al desgaste, humedad, gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (piedra caliza, coralina y ladrillos); ensayo de consistencia normal y tiempo de fraguado de la pasta; ensayo de resistencia a la compresión del mortero y por último se realizó el análisis de resultados, conclusiones y presentación final del trabajo de investigación.

Para el cumplimiento de los objetivos, que buscan como fin último evaluar una alternativa de conservación o restauración para edificaciones coloniales, se llevaron a cabo ensayos mecánicos



en una maquina universal donde se obtuvieron los esfuerzos de compresión de 20 muretes, 10 de estos reforzados con la malla electro-soldada, elaborados bajo un patrón establecido de investigaciones anteriores en busca de simular técnicas antiguas de construcción que puedan asemejarse a las empleadas en la época de las edificaciones donde se encuentra este tipo de mampostería.

En este orden de ideas, teniendo en cuenta que no es posible encontrar los materiales exactos empleados en estas edificaciones y dado que la extracción de ellos se dificulta debido a la reglamentación aplicada a estructuras de carácter patrimonial, se optó por emplear materiales actuales que se asemejen a los antiguos, formando una mezcla tipo ciclópea que represente en gran medida la mampostería utilizada en aquella época. Con el fin de seguir los mismos lineamientos con los cuales se construyeron estas estructuras, se realizó una revisión bibliográfica en la que se definió qué materiales se emplearon, su procedencia, la dosificación y el procedimiento a seguir para la elaboración de los muretes, teniendo en cuenta que fuesen materiales de fácil acceso en la ciudad.

Además, se les aplicaron a los especímenes ensayos no destructivos de ultrasonido, esperándose que las lecturas tomadas en cada punto resulten dispersas debido a que se trata de un material no homogéneo, por tanto, a la hora de realizar el promedio de todas las lecturas diferirá del valor obtenido para el ensayo destructivo, cabe resaltar que para calcular el promedio se le calculó el coeficiente de variación y desviación estándar que permitió establecer un valor máximo y mínimo donde deben estar contenidas las lecturas que serán promediadas por murete, las que no se encontraban en ese rango no fueron tomadas en cuenta. A través de esta investigación se espera



que ocurra un aumento significativo en la resistencia de los especímenes al emplear esta técnica de refuerzo.

La investigación no abordó el comportamiento químico de los materiales tanto individualmente como en conjunto con la malla electro-soldada ni tampoco cubrió el estudio de los muretes bajo compresión diagonal, estos constituyen un punto de partida para futuras investigación donde se quiera profundizar más sobre el tema planteado y abarcar otras propiedades que no se estén incluyendo en esta investigación.

El desarrollo de esta investigación cobra importancia ya que constituye un aporte al conocimiento y análisis del tipo de mampostería estudiada y como es el comportamiento de la misma con la técnica de refuerzo propuesta.



## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN: MIXTA**

La investigación que se desarrollo es de tipología mixta ya que involucro la recolección y análisis de datos cualitativos y cuantitativos, aprovechando lo mejor de cada técnica para brindar la información más profunda y completa posible. Este enfoque metodológico se vio reflejado en la presente investigación, ya que, primeramente, se realizó una revisión bibliográfica contextualizando el tema en estudio, posterior a esto se elaboraron ensayos físicos a los materiales que constituyen el concreto colonial tipo ciclópeo como son: ensayo de resistencia al desgaste, humedad, gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (piedra caliza, coralina y ladrillos); ensayo de consistencia normal y tiempo de fraguado de la pasta; ensayo de resistencia a la compresión del mortero, luego se procedió a la elaboración de los 20 especímenes, de los cuales 10 se reforzaron y finalmente se ensayaron , brindando una serie de datos numéricos que fueron analizados a la luz de conceptos relacionados al tema en estudio, para luego establecer conclusiones y recomendaciones con relación a los mismos.

### **4.2 TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **4.2.1 Información secundaria**

Se realizó una revisión bibliográfica, con el fin de brindar una visión más amplia sobre la situación actual del tema en estudio a nivel regional, nacional e internacional, tomando como base artículos de investigación, tesis de pregrado y postgrado, normas y reglamentos, entre otras fuentes de información.



#### 4.2.2 Información primaria

**Obtención de materiales del murete:** Para el desarrollo del proyecto, se identificaron los diferentes lugares o establecimientos en la ciudad y su área de influencia, de donde se adquirieron los materiales constitutivos de los muretes de concreto colonial elaborados.

La roca caliza, se obtuvo de la cantera “COLONCITO”, ubicada en el municipio de Turbaco, esta cantera fue elegida teniendo en cuenta investigaciones previas donde hacen mención de la misma, destacando el material rocoso proveniente de ella por sus propiedades físicas y mecánicas (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 2014). Por otro lado, la roca coral un tipo de roca sedimentaria que se forma a raíz de los fósiles marinos, en la época de la colonia eran extraídas de las zonas costeras específicamente de las formaciones y/o yacimientos presentes en la isla de tierra bomba. En esta ocasión, las rocas utilizadas para la investigación han sido extraídas de los morros de la boquilla específicamente en estas coordenadas  $10^{\circ}30'37.3''N$   $75^{\circ}30'07.3''W$ , las cuales presentan características físicas muy similares por ser de la misma formación geológica.

Los ladrillos y la arena fueron adquiridos de la distribuidora “Rústicos y Acabados” teniendo en cuenta recomendaciones del arquitecto restaurador Alberto Samudio y la cal que se empleará para la elaboración de la argamasa en proporciones 1:2 cal y arena, es una cal hidratada.

Primeramente, se trituraron los materiales en tamaños manejables para el desarrollo de cada uno de los ensayos que permitieron determinar algunas de sus propiedades,

**Ensayo de resistencia al desgaste:** Este ensayo se llevó a cabo con base en la norma **I.N.V.E.-219-07**, debido de la gradación de los agregados.



Primeramente, para determinar el tipo de muestra con la que se trabajó el ensayo, se realizó la granulometría de los distintos agregados y de acuerdo a lo retenido en cada tamiz se eligió entre granulometría tipo G (ver tabla 2).

Tabla 2. Granulometrías de la muestra para ensayo.

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

Fuente: INV E- 219-07.

Una vez se estableció la granulometría del ensayo, se seleccionó la carga abrasiva correspondiente es decir el número de esferas de acero que se introdujeron en la máquina de los ángeles junto con la muestra de agregado, como lo indica la tabla 3.

Tabla 3. Carga abrasiva.

Granulometría de ensayo	Número de esferas	Masa Total g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: INV E-218-07.

Luego se hizo girar la maquina con una velocidad entre 30 y 33 rpm, girando hasta 1000 revoluciones ya que se trataba de granulometría tipo G, con velocidad angular constante. Una vez culminó esta etapa del ensayo, se descargó el material de la máquina y se hizo pasar por el tamiz n°12 (1.68 mm). La muestra retenida se lavó y se secó en un horno, posteriormente se pesó y se obtuvo el porcentaje de abrasión utilizando la ecuación que dicta la norma.



*Ilustración 8. Muestra de roca coralina dispuesta en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.*



*Ilustración 11. Muestra de roca caliza dispuesta en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.*



*Ilustración 9. Muestra de roca coralina luego de ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.*



*Ilustración 12. Muestra de roca caliza luego de ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles. Fuente: Autores.*



*Ilustración 10. Muestra de roca coralina que paso el tamiz No 12. Fuente: Autores.*



*Ilustración 13. Muestra de roca caliza que paso el tamiz No 12. Fuente: Autores.*



**Ensayo de humedad:** Se realizaron 3 ensayos de humedad, uno por cada tipo de agregado, para llevar a cabo dicho ensayo en el agregado grueso, se tomó como referencia la norma **I.N.V.E-122-07** y se seleccionó la muestra a ensayar con base en la tabla 5. A partir de este ensayo se halló el contenido de agua de los agregados gruesos a emplear en la elaboración de los muretes, trabajando la unidad de masa en gramos. El contenido de humedad se obtuvo en porcentaje.

*Tabla 4 Masa mínima de material húmedo seleccionada para prueba de contenido de agua.*

Tamaño máximo de partícula (pasando 100%)	Tamaño de tamiz estándar	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de agua, reportado a $\pm 0.1\%$	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de agua, reportado a $\pm 1\%$
2 mm o menos	No. 10	20 g	20g <sup>A</sup>
4.75 mm	No. 4	100 g	20g <sup>A</sup>
9.5 mm	3/8 "	500 g	50g
19.0 mm	3/4 "	2.5 kg	250g
37.5 mm	1 1/2 "	10 kg	1kg
75.0 mm	3 "	50 kg	5kg

<sup>A</sup> Para ser representativo, no se deben usar menos de 20g

Fuente: norma **INV E-122-07**.



*Ilustración 14. Muestra de roca caliza, coralina y ladrillo militar sometido a ensayo de humedad.*

Fuente: Autores.

Para realizar el ensayo primeramente se tomó una muestra representativa de cada uno de los materiales la cual se pesó, este dato corresponde al peso húmedo. Posteriormente se llevó el material al horno por 24 horas para volver a pesarlo, tener el peso seco y el del recipiente.



**Ensayo de gravedad específica y absorción:** Se realizaron 3 ensayos de gravedad específica y absorción, uno por cada tipo de agregado, el desarrollo de este ensayo estuvo sujeto a lo estipulado en la norma **I.N.V.E-223-07**. Mediante este ensayo se determinó las gravedades específicas bulk, bulk saturada superficialmente seca y aparente, también se halló el porcentaje de absorción de los agregados.

Inicialmente se sumergió en agua durante 24 horas las muestras de roca caliza, coral y ladrillo con el fin de saturarlas. Transcurrido el tiempo previsto, se secó la muestra superficialmente con un paño y se tomó lectura de la masa de la muestra saturada superficialmente seca en gramos.



*Ilustración 15. Muestras de roca coral y ladrillo militar saturadas. Fuente: Autores.*

Seguido a esto se colocó la muestra en una canastilla metálica y se sumergió en agua para determinar la masa sumergida en agua de la muestra saturada en gramos. Finalmente se colocó la muestra en un recipiente que posteriormente fue llevado al horno durante 24 horas para luego determinar el peso seco para cada una de las muestras.



Los cálculos se realizaron aplicando las ecuaciones descritas en la norma.



*Ilustración 16. Muestra de roca caliza saturada, sumergida. Fuente: Autores.*

**Ensayo de consistencia normal:** La norma que se usó como referencia para llevar a cabo el ensayo de consistencia normal fue la **NTC-110**. Se tomó una muestra de cal de 500 gr, que se homogenizó con un determinado porcentaje de agua hasta formar una pasta que fue dispuesta en el aparato de Vicat (previamente calibrado) para realizar las lecturas correspondientes. Este constituye un ensayo de prueba y error, debido a que el procedimiento descrito se repitió varias veces con diferentes porcentajes de agua hasta que el embolo penetra  $10\text{mm} \pm 1\text{mm}$  en la superficie original 30 segundos después de haber sido soltado.



*Ilustración 17. Homogenización de muestra de cal con determinado porcentaje de agua. Fuente: Autores.*



*Ilustración 18. Disposición de la pasta sobre molde en aparato de Vicat. Fuente: Autores.*

**Ensayo de tiempo de fraguado:** La norma guía para la determinación del tiempo de fraguado de la pasta fue la **I.N.V.E-305-07**. Inicialmente se tomó una muestra de 500 gr de cal y se le adiciono el porcentaje de agua obtenido en el ensayo de consistencia normal, se homogenizo la mezcla hasta formar una pasta según lo descrito en la norma, en un tiempo no mayor a 90 segundos y luego se dispuso en el molde correspondiente. Teniendo en cuenta que el fraguado de la cal es más lento en comparación con el del cemento, se optó por dejar la muestra reposar durante 1 día y luego fue ensayada en el aparato de Vicat empleando la aguja de 1mm. A continuación, se realizaron mediciones cada 30 minutos hasta que se obtuvo una penetración de 25mm o menos.

Cada vez que transcurría el tiempo estipulado para registrar una lectura, se tomaban tres datos que posteriormente fueron promediados para así tener mayor confiabilidad en el resultado y previendo de que en diferentes secciones de la muestra haya fraguado más que en otras.



*Ilustración 19. Ensayo de tiempo de fraguado a muestra de cal. Fuente: Autores.*



*Ilustración 20. Muestra luego de las diferentes lecturas tomadas. Fuente: Autores.*

**Resistencia a la compresión del mortero:** Este ensayo se llevó a cabo con base en la norma **NTC-220**. Las proporciones en masa para formar el mortero usado para el ensayo estuvieron compuestas de una parte cementante, en este caso cal, y 2 partes de arena gradada seca, está proporción para el caso de un solo bloque. La cantidad de agua adicionada a la muestra según recomendaciones de la norma INV E-223 corresponde al 48.5 % del material cementante, en este caso cal, pero teniendo en cuenta las propiedades de la cal, la mezcla requirió un 9.5% más de agua de lo contrario la mezcla se encontraba poco manejable y seca.

La mezcla fue preparada y colocada en los moldes de 50mm según lo descrito en la Norma. Los cubos fueron ensayados para determinar su resistencia a la compresión a los 7 días, 14 días y 28 días, en total se realizaron 9 ensayos es decir 3 cubos por día.



*Ilustración 21. Elaboración de cubos para ensayo de resistencia al mortero. Fuente: Autores.*

Teniendo en cuenta que el mortero elaborado es a base de cal, y esta última presenta propiedades diferentes al cemento, los cubos de mortero no se desmoldaron hasta haber transcurrido al menos tres días porque de lo contrario se encontrarían muy frágiles teniendo en cuenta que el fraguado de la cal es más lento.



*Ilustración 22. Cubos de mortero en proporciones 1:2 de cal y arena (argamasa). Fuente: Autores.*

**Elaboración de muretes:** Los muretes fueron elaborados con la proporción volumétrica 1:2:4 de argamasa, piedra caliza/piedra coralina y ladrillo militar respectivamente. Inicialmente se elaboraron las formaletas en madera en forma de cajón con medidas de 50cmx40cmx20cm para la



disposición del concreto colonial, una vez se tuvieron estas, se procedió a realizar la mezcla que constituye al tipo de mampostería estudiada. Las rocas y los ladrillos fueron fragmentados en tamaños manejables para la elaboración de los especímenes, luego fueron mezclados junto con la argamasa y dispuestos en las respectivas formaletas hasta completar 20 muretes.



*Ilustración 23. Elaboración de muretes de mampostería colonial tipo I. Fuente: Autores.*



**Realización de ensayo de ultrasonido sobre muretes:** Se sometieron los especímenes elaborados a una prueba no destructiva de ultrasonido, realizando varias lecturas en diferentes puntos del murete, siguiendo los lineamientos de la NTC 4325, a estos valores se le calculo el coeficiente de variación y desviación estándar, se le aplico la distribución estadística T Student para sacar la lectura promedio por murete y así eliminar los datos más dispersos.

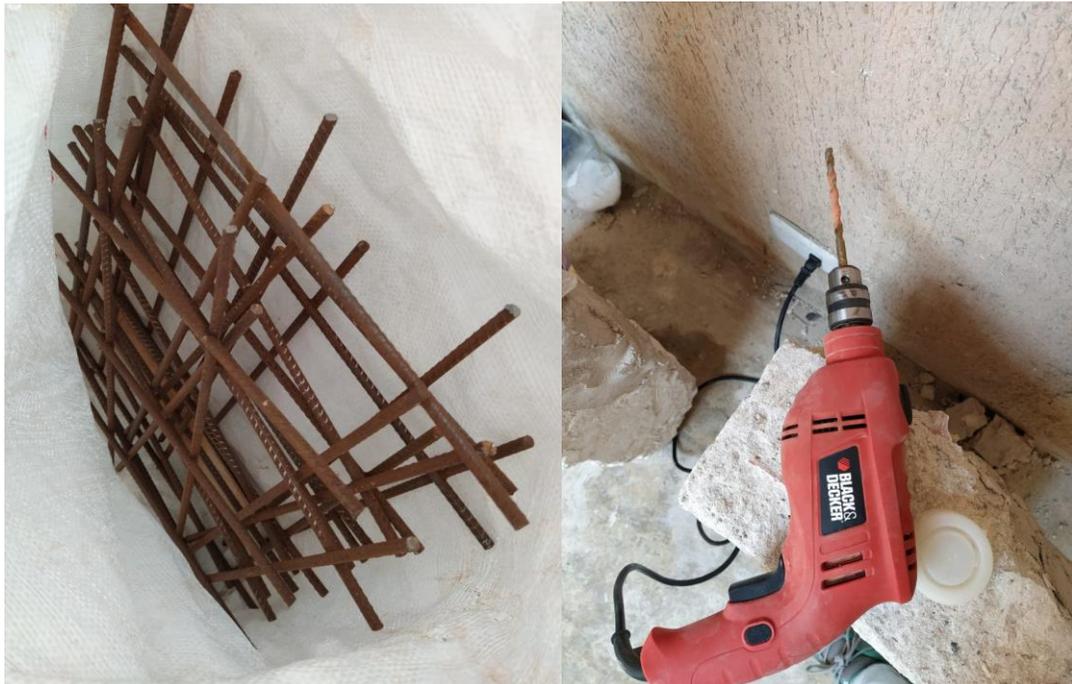


*Ilustración 24. Esayo de ultrasonido sobre muretes de concreto colonial.  
Fuente: Autores.*

El instrumento de ultrasonido está compuesto de dos transductores, uno que emite un pulso ultrasónico y otro que los detecta. Primeramente, se realizó la calibración del equipo, Los transductores se ubicaron en cada cara del murete en la dimensión de 50 cm, se aplicó una pequeña capa de vaselina en la cara de los transductores con el fin de garantizar la adherencia con la superficie del muro y se realizó la medición directa, obteniendo el tiempo que tardo en recorrer la onda el elemento en unidades de microsegundos.



**Reforzamiento de muretes con malla electro-soldada:** Se reforzaron 10 de los 20 especímenes elaborados con una malla electro-soldada de 6.5 mm cada 15. Inicialmente se identificaron los puntos donde se harían las perforaciones de los anclajes. Con la ayuda de un taladro percutor se realizaron las perforaciones empleando una broca de 5/16” teniendo en cuenta que la barra que se ancló era de 1/4”, luego se rellenó con un epóxico de la marca Sika (Sikadur AnchorFix-4) cada orificio, se colocó la malla y se incrustaron los anclajes para luego dejarlo reposar por al menos 4 horas.



*Ilustración 25. Mallas electro-soldadas de 4mm cada 15 y taladro percutor empleado para hacer las perforaciones en los muros.  
Fuente: Autores.*

Se tuvo en cuenta que la malla cumpliera la cuantía mínima para la mampostería donde se iba a instalar, en base al ítem C.14.3.2 y C.14.3.3. la cuantía mínima para refuerzo vertical es 0.0012 y para el horizontal 0.002, por tanto, calculando el área mínima de refuerzo, multiplicando



el delta de recubrimiento por el largo del muro por la cuantía, se tiene que son  $0.12\text{cm}^2/\text{m}$  y  $0.2\text{cm}^2/\text{m}$  respectivamente lo cual es menor al área aportada por la malla a usar, siendo de  $2.21\text{cm}^2/\text{m}$ , valor se puede encontrar en los catálogos comerciales de mallas electro-soldadas.



*Ilustración 26. Epóxico empleado en las perforaciones e instalación de la malla con sus anclajes.  
Fuente: Autores.*

Una vez instalada la malla se le añadió un recubrimiento de 2.5 cm con mortero a base de cal especial para refuerzos armados llamado Planitop HDM Restauo, este es un producto bicomponente de la línea Mapei. Se tuvo en cuenta que el recubrimiento mínimo a la malla de refuerzo fuera para la superficie de la mampostería al menos de 5mm y el externo a la malla 10mm.



*Ilustración 27. Preparación de mortero de recubrimiento a emplear en la mampostería.  
Fuente: Autores.*



*Ilustración 28: Aplicación de mortero de recubrimiento en murete.  
Fuente: Autores.*



**Ensayo de compresión sobre muretes:** Los 20 especímenes elaborados (10 reforzados y 10 sin reforzar) fueron sometidos al ensayo de compresión simple y se registraron las deformaciones que fueron presentando las muestras con el aumento de la carga hasta el momento de falla, estas lecturas se realizaron adaptando un deformimetro a la maquina universal empleada. Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio GEOCONSULTAS LTDA.

Previo al ensayo cada muro fue pesado y se tomó tres lecturas de sus dimensiones de alto, ancho y largo para tomar un valor promedio. El valor de resistencia de cada muro fue dado por el laboratorio en MPa en este documento se presentarán los resultados tanto en MPa como en Kg/cm<sup>2</sup> y se harán comparaciones en Kg/cm<sup>2</sup> debido a que es la unidad empleada en investigaciones pasadas y las deformaciones en milímetros.



*Ilustración 29. Ensayo de compresión en murete.  
Fuente: Autores.*



*Ilustración 30. Pesado de murete en laboratorio previo al ensayo.  
Fuente: Autores.*

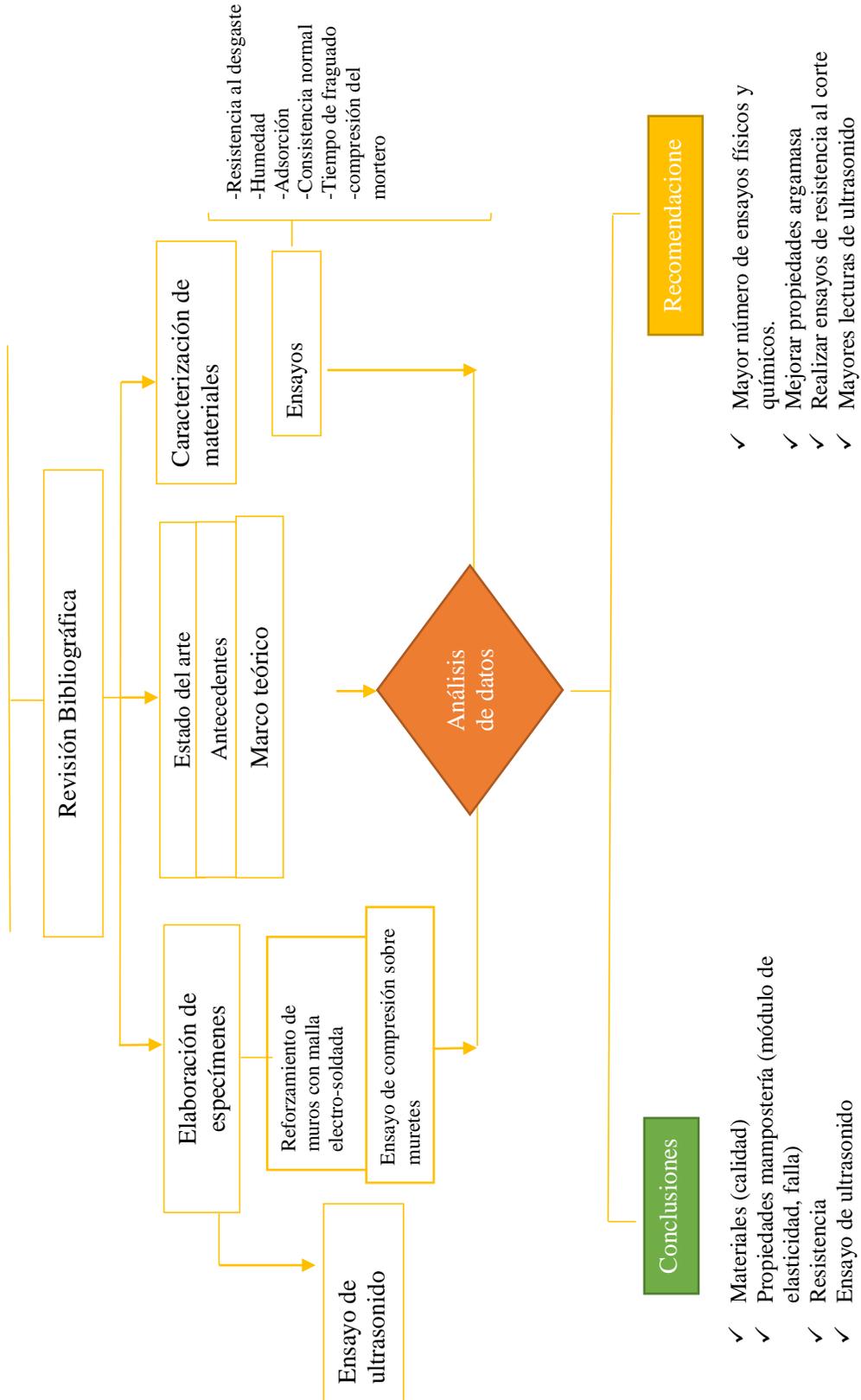


Se realizó una gráfica de esfuerzo deformación para cada murete y se ajustó polinómicamente; adicionalmente se determinó el módulo de elasticidad de la mampostería por medio de la pendiente de la zona elástica del elemento y luego fue comparado con el módulo hallado usando la relación planteada en la NSR-10.

Finalmente, se realizaron los respectivos análisis de resultados tanto de los ensayos a los materiales constitutivos previamente tabulados y graficados para un mejor entendimiento, como los ensayos realizados a los muretes. Las resistencias a la compresión obtenidas de los especímenes fueron comparadas entre los muros reforzados y sin reforzar, al igual que los resultados obtenidos con el ensayo no destructivo de ultrasonido con el destructivo de compresión simple fueron confrontados entre sí, además se analizó los patrones de falla que se presentaron en los muros cuando se sometieron al ensayo de compresión. Por último, se establecieron unas conclusiones acordes a los resultados obtenidos, y se brindaron unas recomendaciones para futuras investigaciones en el tema tratado.



## ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE MURETES DE MAMPOSTERÍA SIN REFORZAR Y REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA PARA USO EN EDIFICACIONES COLONIALES EN PROCESOS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN





## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

De acuerdo con la metodología planteada, se llevaron a cabo todos los ensayos propuestos tanto para los materiales como para los muretes de concreto colonial y se obtuvieron los resultados finales, descritos a continuación con sus respectivos análisis.

### 5.1 Análisis de resultados ensayo de resistencia al desgaste

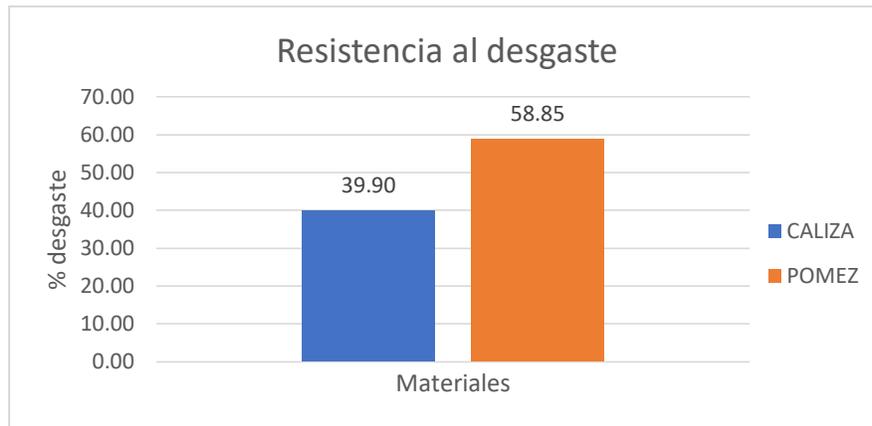
La resistencia a la abrasión es usada generalmente como un índice de la calidad de los agregados, ya que proporciona una idea de la capacidad de éstos para producir concretos resistentes. La resistencia al desgaste es una propiedad que cobra importancia cuando las partículas del material van a estar sometidas a un roce continuo, por lo tanto, está ligado con la durabilidad de éste. Para calcular este valor es necesario usar la fórmula dada en la norma INV-E-219-07 (Ver Anexo 6. Ecuación Resistencia al desgaste).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo realizado a la roca caliza y coralina:

*Tabla 5. Porcentaje de desgaste para la roca caliza y coralina.*

Autor	July Pauline Devoz Díaz	Lugar	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas		
<b>Descripción</b>	Ensayos de desgaste para agregados gruesos		
<b>Ensayo</b>	RESISTENCIA AL DESGASTE INVE-219-07		
<b>Tipo</b>	Desgaste (%)		
<b>Roca Coralina</b>	58.85		
<b>Roca Caliza</b>	39.90		

*Fuente: Autores.*



Gráfica 2. Resultado Resistencia al desgaste.  
Fuente: Autores.

Tomando como referencia la normativa de las Especificaciones Generales para la construcción de caminos, calles y puentes (NIC-2000) en la sección 1003 el agregado grueso de acuerdo con AASHTO M80 para la prueba de la determinación a la resistencia al desgaste por el método de la máquina de Los Ángeles establecen que el máximo valor de desgaste es del 40% al 50%. En este caso, la muestra utilizada de roca caliza obtuvo un desgaste de 39.9% cumpliendo con el porcentaje permisible establecido por la norma, resultado similar a investigaciones anteriores como la de (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 2014b) donde estudiándose esta roca se obtuvo un desgaste promedio de 38.07% y en la investigación de (Acuña, 2018) un desgaste de 39.24%, lo que indica una mayor resistencia en comparación con la roca coralina, siendo esta última una roca más blanda, produciéndose un desgaste de 58.85%.

## 5.2 Análisis de resultados ensayo de humedad

Es importante reconocer que los agregados pueden poseer algún grado de humedad ya que están constituidos por poros de diferentes tamaños, y al momento de estar a la intemperie, pueden estar llenos con agua, entendiéndose esto, es de suma importancia conocer esta propiedad, ya que es posible determinar si los agregados que se están empleando le aportan agua a la mezcla.

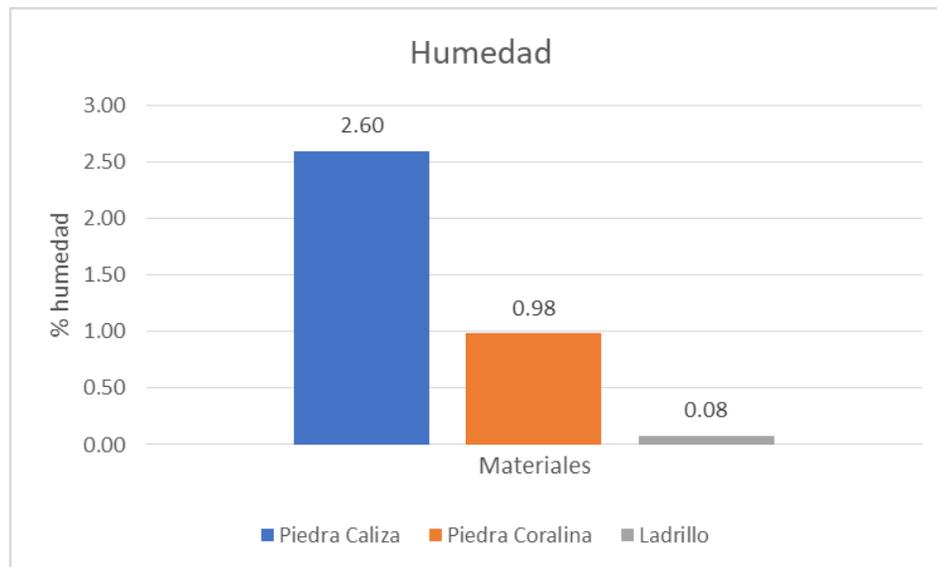


En la tabla 6 se consignan los valores obtenidos después de realizar el ensayo a los materiales que componen los muretes como son la roca caliza, coralina y el ladrillo y aplicar la fórmula pertinente arrojada por la norma del ensayo de humedad INV-E-122-07 (Ver Anexo 2. Ecuación contenida de agua).

Tabla 6. Ensayo de humedad INV-E-122-07

<b>Autor</b>	July Pauline Devoz Díaz	<b>Lugar</b>	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas		
<b>Descripción</b>	Ensayos a materiales constitutivos de la mampostería colonial tipo I		
<b>Ensayo</b>	HUMEDAD INV-E-122-07		
<b>Tipo</b>	Humedad (%)		
<b>Roca Caliza</b>	2.60		
<b>Roca Coralina</b>	0.98		
<b>Ladrillo</b>	0.08		

Fuente: Autores.



Gráfica 3. Resultado ensayo de humedad.  
Fuente: Autores.



La humedad total de los agregados es relativamente baja para la roca coralina con un porcentaje de 0.98% y bastante baja para el ladrillo con un porcentaje de 0.08%, esto nos quiere decir que en los poros los agregados estaban parcialmente secos, por otro lado la roca caliza obtuvo una humedad un poco mayor en comparación con los otros dos agregados 2.6%, sin embargo sigue siendo un valor relativamente bajo; de esto podemos deducir que los agregados nos aportan una mínima cantidad de agua a la mezcla a realizar.

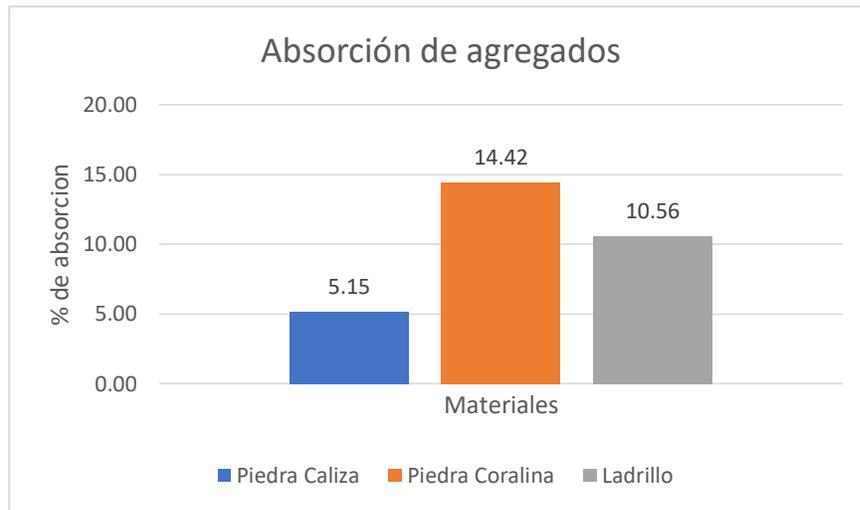
### 5.3 Análisis de resultado ensayo de gravedad específica absorción de los agregados

La gravedad específica es una característica de los agregados empleada para el cálculo del volumen ocupado de los mismos en mezclas que son proporcionadas o analizadas con base en un volumen absoluto. Por otro lado, la absorción se utiliza para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en el espacio de sus poros dentro de las partículas constituyentes, expresado como un porcentaje de la masa seca (Ver fórmula en Anexo 4. Fórmulas gravedad específica)

Tabla 7. Resultados ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados.

Autor	July Pauline Devoz Díaz		Lugar	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas			
<b>Descripción</b>	Ensayos a materiales constitutivos de concreto ciclópeo			
<b>Ensayo</b>	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS INV-E-223-07			
<b>Tipo</b>	$Gsb$	$Gsb_{SSS}$	$Gsa$	% Absorción
<b>Roca Caliza</b>	2.31	2.43	2.62	5.15
<b>Roca Coralina</b>	1.61	1.85	2.10	14.42
<b>Ladrillo</b>	2.02	2.23	2.57	10.56

Fuente: Autores.



Gráfica 4. Resultado ensayo de absorción de agregados.

En la tabla 7, se encuentran los resultados de la gravedad específica bulk, bulk saturada superficialmente seca y aparente para la roca caliza, coralina y el ladrillo.

El porcentaje de absorción de un agregado está ligado con la porosidad de las partículas de agregado y del tamaño y forma de los poros. Conocer la cantidad de agua que puede ser alojada por el agregado tiende a ser de mucha utilidad, en ocasiones se emplea como un valor que se especifica para aprobar o rechazar el agregado en una cierta aplicación ya que puede influir en otras propiedades del mismo como su resistencia mecánica, su estabilidad química entre otras. Para los agregados con que se trabajó, se obtuvo un porcentaje de absorción de la roca caliza de 5.15%, el ladrillo de 10.56% y la roca coralina 14.42%, es decir la piedra coralina debido a su porosidad posee una mayor capacidad de almacenar agua estando en contacto con la misma.

#### 5.4 Análisis de resultado ensayo de consistencia normal

El ensayo de consistencia normal permite conocer la cantidad de agua que es necesaria añadir a un peso de material cementante, en este caso cal (para este ensayo 500g) con el fin que la



pasta obtenga una fluidez óptima y una plasticidad ideal. El ensayo es importante ya que, aunque todos los morteros manejan la misma condición (una parte de cemento o cal, una parte de agregado fino y una parte de agua) cada material dependiendo de su origen presenta variaciones entre sí. Además, este resultado constituye un punto de partida para determinar el tiempo de fraguado de la pasta y seguido a este último el ensayo de resistencia en morteros.

En la tabla 8, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio para la muestra de cal utilizada marca Caltek. El ensayo arrojó que la consistencia normal para la cal empleada corresponde al 47.8% lo que equivale a 239ml de agua por cada 500 gr de cal. Este resultado de consistencia es mucho más elevado que el de los cementos que manejan un porcentaje entre el 23% al 33% de agua, esto debido a las propiedades de la cal, ya que tienden a absorber mayor cantidad de agua.

Tabla 8. Consistencia normal de la cal.

Autor	July Pauline Devoz Díaz		Lugar	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas			
Descripción	Ensayos material cementante			
Ensayo	CONSISTENCIA NORMAL NTC-110			
	Porcentaje de agua (%)	Penetración de la aguja (mm)		
Muestra 1	45	7		
Muestra 2	49	11		
Muestra 3	50	12.5		
Consistencia normal (%)	47.80%			

Fuente:  
Autores



### 5.5 Análisis de resultado ensayo tiempo de fraguado

El ensayo de tiempo de fraguado permite conocer el periodo en que la cal al momento de entrar en contacto con el agua, pasa de su estado plástico, dejando de tener fluidez hasta adquirir cierto grado de endurecimiento. En este periodo la pasta atraviesa una serie de reacciones químicas que permitan la hidratación y el desarrollo de las propiedades del material.

Tabla 9. Ensayo tiempo de fraguado de la cal.

Autor	July Pauline Devoz Díaz		Lugar	Universidad de Cartagena		
	Laura Cristina Terán Simancas					
Descripción	Ensayos material cementante					
Ensayo	TIEMPO DE FRAGUADO INV-E-305-07					
Lectura	Tiempo (minutos)	Penetración (mm)	Inicio =10:30 am 29/10/19 Fin: 6:00 pm 31/10/19			
1	1440	36				
2	1560	35				
2	1680	35				
3	1800	34				
3	1920	35				
4	2040	33				
4	2880	32				
5	3000	30				
5	3120	29				
6	3480	29				
6	4020	27				
7	4620	24				
<b>Tiempo para una lectura de 25 mm</b>	<b>4424</b>	<b>25</b>				

Fuente: Autores

En la Tabla 9 se observan los resultados de las lecturas realizadas a la muestra de cal para determinar el tiempo de fraguado. Luego de graficar las lecturas de penetración en un tiempo dado y ajustar la curva, se obtuvo que el tiempo necesario para que se produzca el fraguado de la cal



empleada en la elaboración de los muretes de la investigación, es de 3 días, 1 hora y 44 minutos aproximadamente, el cual corresponde a la penetración de 25mm empleando el aparato de Vicat, bajo una consistencia normal de 47.8%.

Este resultado en la investigación es de contribución para conocer las propiedades de la Cal, que constituye el agente cementante en el mortero empleado en la elaboración de los muretes.

### 5.6 Análisis de resultado ensayo de compresión del mortero

Las ventajas y características que aportan la cal a los morteros son innumerables, como la mejora de plasticidad y trabajabilidad, incremento de la retención del agua, obtención de morteros más flexibles y con mayor adherencia, sin embargo, estas ventajas se contrarrestan en los morteros de cal y arena debido a su baja resistencia por su baja velocidad de endurecimiento.



*Ilustración 31. Ensayo de compresión a cubo de mortero de cal y arena.  
Fuente: Autores.*



Ilustración 32. Cubo de mortero de cal y arena luego de ser ensayado.  
Fuente: Autores.

Este ensayo permitió evaluar el desarrollo de la resistencia del mortero en diferentes edades, empleado para la construcción de los muros. El mortero que se analizó fue de cal y arena en proporciones 1:2. La prueba se realizó en 8 cubos, los cuales fueron elaborados y desencofrados como mínimo al segundo día, de lo contrario se encontraban aun débiles teniendo en cuenta el fraguado de la cal.

En la tabla Tabla 10 se presentan los resultados de las resistencias a compresión a siete, catorce y veintiocho días para cubos de mortero a base de cal, arena y agua.

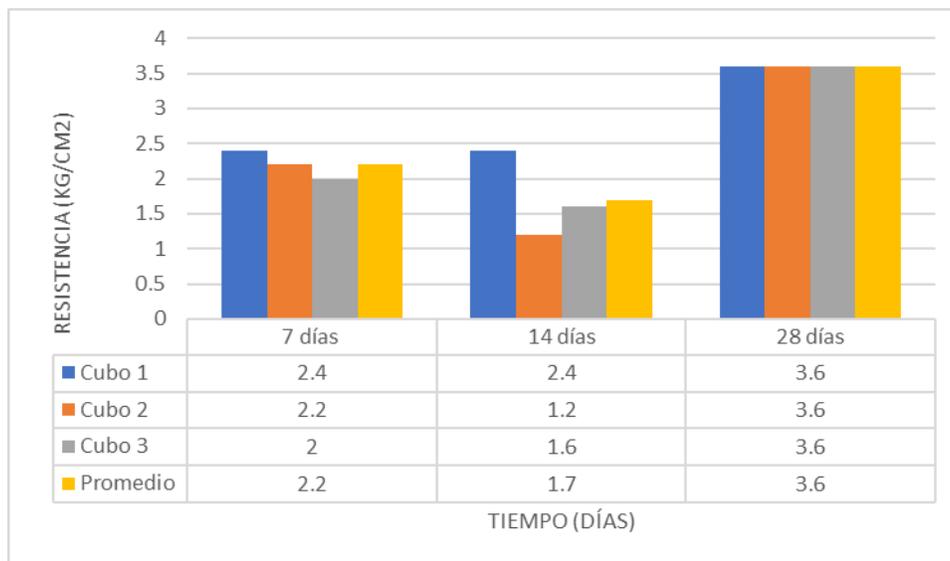
Tabla 10. Ensayo de Resistencia a la compresión en cubos de mortero a los 7, 14 y 28 días.

Autor	July Pauline Devoz Díaz	Lugar	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas		
Descripción	Ensayo de resistencia a mortero de cal y arena (Argamasa)		
Ensayo	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL MORTERO NTC-220</b>		
Muestra	Carga maxima (kN)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (Mpa)
1	0.6	2.2	0.22
2	0.5		
3	0.6	1.7	0.17
4	0.3		



5	0.4		
6	0.9		
7	0.9	3.6	0.36
8	0.9		

Fuente: Autores.



Gráfica 5. Resistencia a compresión del mortero de cal a los 7,14 y 28 días.

Fuente: Autores.

Se esperaba una tendencia creciente de la resistencia a la compresión del mortero a medida que las muestras tenían mayor cantidad de días para que continuara su fraguado, sin embargo, a los 14 días hubo un pequeño descenso obteniendo una resistencia de  $1.7 \text{ kg/cm}^2$ , en comparación con la resistencia los siete días que obtuvo un valor de  $2.2 \text{ kg/cm}^2$ . Este valor de resistencia de  $2.2 \text{ kg/cm}^2$  se puede comparar con investigaciones anteriores encontrando que en la tesis de grado “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” elaborada por (Acuña, 2018), para una dosificación de 1:2 (cal: arena), obtuvo un valor de resistencia promedio del mortero de  $2.11 \text{ kg/cm}^2$ . De igual manera, en el estudio “Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias” (España, Puello & Almanza, 2009) la resistencia de un mortero de iguales características tuvo un valor de  $1.83 \text{ Kg/cm}^2$ . Se puede



analizar entonces que para esta investigación se obtuvo un resultado mayor al encontrado en estudios pasados.

### 5.7 Análisis de resultados ensayo de ultrasonido.

Luego de construidos los muretes, se procedió a realizar el ensayo de ultrasonido con un aparato especializado y suministrado por ARNOLDO BERROCAL INGENIERÍA S.A.S, el cual arroja como resultado las velocidades de onda que están consignadas en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 11. Resultados de ensayo de ultrasonido a muretes.

Autor		July Pauline Devoz Díaz Laura Cristina Terán Simancas										Lugar	GEOCONSULTAS LTDA
Descripción		Morteros de mampostería colonial no reforzados											
Ensayo		Ensayo de Ultrasonido											
Murete	DESCRIPCIÓN	LECTURAS										LECTURA PROMEDIO	COV
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
N-01	SIN REFUERZO	6.80	6.70	7.30	6.20	5.60	5.80	7.30	6.80	6.00	6.90	6.7	9%
N-02	SIN REFUERZO	8.20	6.60	8.10	6.90	7.90	6.70	8.00	6.80	7.30	5.60	6.9	12%
N-03	SIN REFUERZO	6.20	6.00	7.50	6.50	7.10	6.40	7.60	6.00	7.20	5.90	6.4	10%
N-04	SIN REFUERZO	9.80	8.80	10.30	6.60	10.30	8.40	5.60	7.80	8.10	7.00	8.3	19%
N-05	SIN REFUERZO	8.30	9.80	7.90	8.60	6.00	7.60	6.70	8.80	9.90	7.20	8.2	16%
N-06	SIN REFUERZO	5.60	5.30	6.50	5.60	5.90	6.90	6.30	6.90	8.30	6.80	6.4	14%
N-07	SIN REFUERZO	9.00	6.80	6.70	5.40	8.90	6.70	6.50	6.70	5.40	6.70	6.7	18%
N-08	SIN REFUERZO	8.80	7.90	7.10	9.00	7.70	5.90	6.30	6.10	8.30	7.50	7.6	15%
N-09	SIN REFUERZO	7.00	5.50	6.40	5.10	5.80	6.10	5.50	5.10	5.70	6.80	5.9	11%
N-10	SIN REFUERZO	6.50	5.90	7.60	8.10	7.20	7.20	5.50	7.80	9.10	9.90	6.2	18%
E-01	MALLA	6.00	5.80	6.10	6.80	8.40	6.00	8.90	6.00	6.20	5.70	6.2	17%
E-02	MALLA	7.10	5.60	5.60	5.90	5.50	4.80	5.50	8.00	6.40	7.20	5.8	16%
E-03	MALLA	6.60	6.00	6.40	6.30	6.90	6.40	7.30	6.70	6.20	7.80	6.6	8%
E-04	MALLA	6.10	7.20	8.40	6.10	10.10	7.80	5.90	8.40	7.90	9.40	7.9	18%
E-05	MALLA	6.50	7.30	7.60	8.00	8.50	8.90	5.60	7.00	8.10	6.10	7.5	14%
E-06	MALLA	6.50	7.50	8.20	4.90	7.40	6.90	6.30	5.00	6.20	6.60	6.5	16%
E-07	MALLA	6.50	4.90	8.50	7.90	5.10	5.40	6.00	9.50	7.90	5.90	6.3	23%
E-08	MALLA	5.40	4.40	8.30	8.20	7.00	5.10	6.70	6.10	9.00	6.60	6.6	22%
E-09	MALLA	7.30	7.80	6.50	4.50	6.10	5.00	6.00	6.00	7.20	5.10	5.8	18%
E-10	MALLA	7.60	6.50	6.30	6.10	5.40	6.10	7.00	4.60	6.70	7.10	6.0	14%

Fuente: Autores.

Como se puede observar, se tomó diez lecturas del tiempo que duró la onda en recorrer la distancia de cada murete (50cm) y luego se determinó una lectura promedio haciendo uso de la distribución de probabilidad T Student, debido a que se trató de un número de muestras pequeño que no superaba los 30 datos. Seguido a esto, se determinó la velocidad utilizando la ecuación pertinente y multiplicando por el factor  $10^6$  para pasar de microsegundos a segundos:



$$v = \frac{x}{t} * 10^6$$

Dónde: v= Velocidad (m/s)    x= distancia (m)    t= tiempo (μs)

En la tabla 12 se anexa un resumen de los resultados de lecturas promedios realizado a cada espécimen y la velocidad de pulso correspondiente para cada uno, producto de la prueba de ultrasonido.

Tabla 12. Resumen resultados de ensayo de ultrasonido.

Autor	July Pauline Devoz Díaz		Lugar	GEOCONSULTAS LTDA	
	Laura Cristina Terán Simancas				
Descripción	Morteros de mampostería colonial no reforzados				
Ensayo	Resistencia a la compresión del mortero NTC 3495				
Murete	DESCRIPCIÓN	LECTURA PROMEDIO (Ms)	COV (%)	VEL PROMEDIO (m/s)	
N-01	SIN REFUERZO	6.7	9%	7485.0	
N-02	SIN REFUERZO	6.9	12%	7220.2	
N-03	SIN REFUERZO	6.4	10%	7853.4	
N-04	SIN REFUERZO	8.3	19%	6042.3	
N-05	SIN REFUERZO	8.2	16%	6068.0	
N-06	SIN REFUERZO	6.4	14%	7795.1	
N-07	SIN REFUERZO	6.7	18%	7481.3	
N-08	SIN REFUERZO	7.6	15%	6622.5	
N-09	SIN REFUERZO	5.9	11%	8547.0	
N-10	SIN REFUERZO	6.2	18%	8086.3	
E-01	MALLA	6.2	17%	8086.3	
E-02	MALLA	5.8	16%	8695.7	
E-03	MALLA	6.6	8%	7633.6	
E-04	MALLA	7.9	18%	6297.2	
E-05	MALLA	7.5	14%	6689.0	
E-06	MALLA	6.5	16%	7692.3	
E-07	MALLA	6.3	23%	8000.0	
E-08	MALLA	6.6	22%	7575.8	
E-09	MALLA	5.8	18%	8620.7	
E-10	MALLA	6.0	14%	8298.8	

Fuente: Autores.



Se puede observar que los valores tienen cierto grado de dispersión, presentando coeficientes de variación altos como los de los muretes N-04, N-10, E-04, E-07, E-08 y E-09 de 19%, 18%, 18%, 23%, 22% y 18% respectivamente. Esto ocurre debido a la naturaleza anisotrópica del elemento de concreto colonial ya que por sus propias características no brinda una continuidad entre los elementos que componen su matriz.

Entre los muretes no reforzados, la velocidad mínima de pulso la obtuvo el murete N-04 y la máxima el N-04 con un valor de 6042.3 m/s y 8547.01 m/s respectivamente. De igual modo en los muretes reforzados con malla electro-soldada, la velocidad menor fue en el murete E-04 con 6297.23m/s y la mayor en el murete E-02 con 8695.65 m/s. La velocidad promedio para el primer grupo de muretes es de 73201.1 m/s y la del segundo grupo de 7758.92 m/s.

Según (Carcaño, Iván, & Castillo, 2004) en su artículo “*Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados*” menciona que la velocidad de pulso ultrasónico es una prueba no destructiva que se ha utilizado desde hace 50 años para evaluar la calidad del concreto. De acuerdo a la siguiente tabla de Malhotra (1985) y los datos obtenidos del ensayo presentados en la Tabla 12 se puede determinar la calidad del concreto con el que fueron elaborados los especímenes estudiados.

Tabla 13. Clasificación del concreto de acuerdo a su velocidad ultrasónica en m/s.

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: (Carcaño et al., 2004).



De acuerdo a la tabla mostrada anteriormente y teniendo en cuenta las velocidades obtenidas del ensayo de ultrasonido ya analizadas es posible observar que la calidad de los muretes elaborados es excelente, sin perder de vista que esta tabla es en base al concreto convencional.

A su vez, en la Tabla 14 se sintetiza el análisis estadístico realizado, con un nivel de confiabilidad del 95% y una significancia del 5%, en donde se calculó el promedio de lecturas realizadas para el murete N-01, este procedimiento se repite para cada uno de los muretes.

Tabla 14. Análisis estadístico t student.

MURETE E-01	DATOS		PROMEDIO	RESISTENCIA	$\bar{X}$	$t_{\alpha}/2$	S	n
Muretes de roca coralina, caliza y ladrillo militar.	6.00	5.82< $\mu$ <7.36	6.18	kg/cm <sup>2</sup>	6.59	2.262	1.07	10
	5.80							
	6.10							
	6.80							
	8.40							
	6.00							
	8.90							
	6.00							
	6.20							
	5.70							

Fuente: Autores.

### 5.8 Resultado y análisis de ensayo de compresión simple a muretes no reforzados.

A su vez, a los muretes elaborados previamente y ensayados por medio de ultrasonido se les realizó la prueba de resistencia a la compresión en el laboratorio de GEOCONSULTAS LTDA. En primer lugar, se midieron las dimensiones (largo, ancho y espesor) de cada uno y luego se dispusieron en la máquina universal de acuerdo con las especificaciones dadas en la Norma Técnica Colombiana NTC 3495. Durante la prueba se tomó la lectura del dial correspondiente a la deformación ocurrida a medida que aumentaba la carga aplicada a cada murete.



*Ilustración 33. Falla típica de muretes ensayados a la compresión sin reforzar.*

*Fuente: Autores.*

Durante este proceso, se pudo observar el comportamiento de los muretes sin reforzar a medida que se le aplicaban carga, y se caracterizaron por una falla longitudinal en el mortero o argamasa a través de toda la sección rodeando los materiales constituyentes del espécimen, seguido del desprendimiento de los mismos en la parte superior del murete (ver Ilustración 33). Esto sucede, debido a que la argamasa tiene una baja resistencia a la compresión en comparación a las rocas coralinas, calizas y ladrillo tolete que conforman el elemento en estudio, por tanto, se le atribuye al mortero o argamasa el componente que desencadenó la falla en el espécimen ya que una vez aplicada la carga, fue el primero en perder cohesión, además hay que resaltar que la cal empleada para la elaboración del mortero se trata de una cal hidratada diferente a las cales empleadas en la época colonial (cal viva), cuyo proceso de apagado podía durar varios meses. De igual modo, en la mampostería la falla normal según (Rougier, 2007) es por agrietamiento vertical



debido a la diferencia entre los módulos de Poisson del mortero y los componentes de la mampostería sumado a la tracción lateral generada en los costados.

En la Tabla 15 se encuentran consignados los diferentes datos de cada murete al momento de ser ensayados, los cuales contribuyeron para el cálculo de la resistencia de los mismos. Los muretes que se encuentran subrayados (con color salmón) corresponden a los valores que no se tomaron en cuenta para el cálculo del valor de resistencia promedio luego de realizado un análisis estadístico, puesto que se salían del rango considerado de acuerdo a la distribución de probabilidad T-Student. Igualmente, en la parte inferior de la tabla se presentan dos valores promedio; el numero 1 incluye todos los resultados del ensayo y el numero 2 únicamente con los valores seleccionados (Datos sin resaltar).

Tabla 15. Resultados ensayo Resistencia a la compresión de muretes de mampostería colonial tipo I no reforzados.

Autor		July Pauline Devoz Díaz		Lugar	GEOCONSULTAS LTDA		
		Laura Cristina Terán Simancas					
Descripción		Morteros de mampostería colonial no reforzados					
Ensayo		Resistencia a la compresión del mortero NTC 3495					
Murete	Carga Maxima (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia experimental (Kg/cm <sup>2</sup> )	Factor de corrección	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia corregida (Kg/cm <sup>2</sup> )
N-01	72.00	74260.00	742.60	9.70	1.05	1.01	10.18
N-02	13.00	75556.25	755.56	1.72	1.05	0.18	1.80
N-03	34.00	71962.50	719.63	4.72	1.05	0.50	4.96
N-04	33.00	71953.13	719.53	4.59	1.05	0.48	4.81
N-05	27.00	74607.00	746.07	3.62	1.05	0.38	3.79
N-06	18.00	97073.04	970.73	1.85	1.01	0.19	1.87
N-07	35.00	79693.69	796.94	4.39	1.03	0.45	4.54
N-08	58.00	81910.50	819.11	7.08	1.04	0.74	7.36
N-09	54.00	80598.00	805.98	6.70	1.04	0.70	6.98
N-10	28.00	80000.00	800.00	3.50	1.04	0.37	3.65
Promedio 1	37.20	<b>Rango</b>	46.50	-	27.90		4.99
Promedio 2	31.40						4.35

Fuente: Autores.



Tabla 16. Cálculo de Resistencia promedio para los muretes no reforzados.

MATERIAL	DATOS	INTERVALOS DE CONFIABILIDAD	PROMEDIO	RESISTENCIA	$\bar{x}$	$t_{\alpha/2}$	S	n
Muretes de roca coralina, caliza y ladrillo militar.	10.18	3,24< $\mu$ <6.74	4.35	kg/cm <sup>2</sup>	4.99	2.262	2.45	10
	1.80							
	4.96							
	4.81							
	3.79							
	1.87							
	4.54							
	7.36							
	6.98							
	3.65							

Fuente: Autores.

Tabla 16 se resume el análisis estadístico realizado, con un nivel de confiabilidad del 95% y una significancia del 5%, se calculó un intervalo de confiabilidad para la selección de los datos a emplear en la resistencia promedio. Para la distribución antes mencionada el intervalo de confianza se calculó empleando la ecuación correspondiente (Ver Anexo 8. Ecuación para determinar el intervalo de confianza)

Se le puede atribuir la alta o baja resistencia obtenida en los muretes N-01, N-02, N-06, N-08 y N-09 a la falta de normativa en la construcción de este tipo de muretes, ya que, aunque se traten de seguir los lineamientos contemplados actualmente y las recomendaciones de personas expertas en el área, la elaboración de los especímenes siempre tendrá cierto grado de empirismo. En el concreto ciclópeo la distribución de los materiales constituyentes juega un papel importante ya que una distribución inadecuada genera mayores planos de fallas debido a la insuficiencia de material aglutinante entre un agregado y otro, siendo la argamasa la matriz que une los elementos del esqueleto granular entre sí y en gran medida responsable de la resistencia.



De acuerdo con la tesis de grado “*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 & Gamarra Torres, 2016) las resistencias a la compresión de muretes coloniales fabricados con materiales obtenidos de canteras actuales oscilan entre  $4.05 \text{ Kg/cm}^2$  y  $5.38 \text{ Kg/cm}^2$ . A su vez, (Acuña, 2018) en la tesis “*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*” obtiene una resistencia promedio de  $3.69 \text{ Kg/cm}^2$ , por lo que se puede decir que el resultado obtenido en la presente investigación se encuentra dentro del rango ya antes estudiado, además teniendo resultados muy próximos con respecto a las investigaciones pasadas.

Sin embargo, comparando el resultado obtenido con el código Italiano “*Muratura in pietrame disordinata*” para una mampostería de características similares el rango oscila entre 1.0 y 1.8 MPa, valores considerablemente altos en comparación a los hallados en los mencionados muretes estudiados en esta investigación, esta diferencia puede ser ocasionada por la calidad del mortero con el que fueron elaborados los especímenes como se explica a continuación.

De los resultados de resistencia a la compresión de los muretes, también se pueden comparar con los resultados obtenidos para el mortero con el que fueron elaborados, ya que el mortero presentó una resistencia máxima de  $3.6 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días y la resistencia promedio de los muros fue de  $4.35 \text{ kg/cm}^2$ , valores que se encuentran cercanos y dan a entender que el mortero juega un papel importante en la resistencia de la mampostería y puede explicarse el hecho de que la falla haya sido a causa del mismo.



## 5.9 Relación entre ensayo de ultrasonido y de compresión simple

Como se ha mencionado en ocasiones anteriores, los muretes con los que se trabajó son de concreto ciclópeo contruidos con diferentes tipos de materiales como ladrillos, argamasa y rocas. Esta composición genera una matriz completamente anisotrópica por lo que no están constituidos por un material uniforme. Esta condición genera una problemática al momento de realizar los análisis de los ensayos aplicados a los especímenes.

En investigaciones anteriores, se han realizado de igual modo ensayos de ultrasonido y de compresión simple a muretes contruidos de manera similar a los que están en estudio dentro de esta investigación. Tal es el caso de (Acuña, 2018) quien al realizar una correlación entre las dos pruebas encontró una resistencia promedio de 35.56 Kg/cm<sup>2</sup>. Igualmente (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016) realizaron pruebas de ultrasonido a la contraescarpa de las murallas y hallaron una resistencia promedio de 39.88 Kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo al realizar una comparación entre los resultados de ensayos aplicados a muretes contruidos y núcleos extraídos de casas coloniales se halló una diferencia bastante notoria entre un método y el otro como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 17. Cuadro comparativo de resultados.

TESTIGO	RESISTENCIA A COMPRESION (Kg-f/cm <sup>2</sup> )	
	Método destructivo	Método ultrasonido
<b>A</b> Muretes elaborados con materiales actuales	4,46	93,97
<b>B</b> Muretes elaborados con materiales antiguos	10,98	106,48
<b>C</b> Muretes originales extraídos	6,26	75,86
<b>D</b> Contraescarpa de la muralla	6,26	39,88

Fuente: (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016).



Esta diferencia de resultados se produce debido a que en el ultrasonido se halla la velocidad equivalente a la que la onda atraviesa el material sin tener en cuenta su composición anisotrópica o el elemento que falla primero, cosa contraria a el ensayo destructivo donde el elemento falla en el momento en que uno de sus componentes falla. Es por esto que el resultado que arroja la prueba no destructiva es irreal y poco confiable (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, no es posible estimar la resistencia a la compresión de los muretes de mampostería colonial tomando la velocidad de pulso, ya que este es un ensayo utilizado para concreto armado donde la matriz es mucho más homogénea y donde existen graficas de datos históricos donde ya se ha establecido la relación de estos dos parámetros, a diferencia del concreto colonial utilizado en este estudio. Además, al momento de realizar una correlación entre los resultados de ultrasonido y compresión simple, se observó que los datos se encontraban dispersos y sesgados al lado derecho de la gráfica como se puede ver en la gráfica 3, por lo que no tenían una tendencia definida. Esto es consecuencia de que todos los muretes se elaboraron con los mismos materiales y bajo las mismas condiciones, es por esto que los puntos están sesgados a un lado de la gráfica.

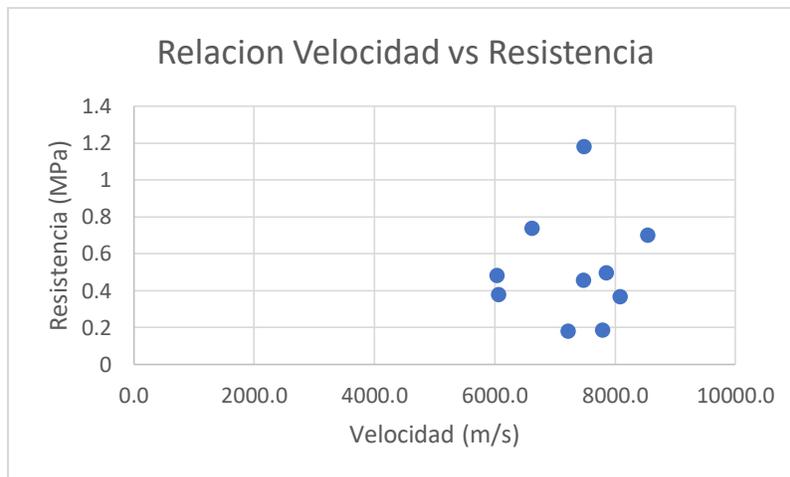
Para solucionar esto, es pertinente plantear que es necesario realizar la investigación variando diferentes puntos como lo son: relación agua/cal, materiales, morteros de recubrimiento y dosificaciones, lo que resultará en velocidades de pulso dentro de un rango más amplio, permitiendo tener una muestra representativa para realizar la correlación correlaciones adecuadas y más completas.



Tabla 18. Resultados ensayo de ultrasonido y de compresión simple para muretes no reforzados.

Ensayo de ultrasonido vs compresión simple				
Murete	Velocidad (m/s)	COV	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (MPa)
N-01	7485.0	9%	10.180	1.180
N-02	7220.2	12%	1.800	0.180
N-03	7853.4	10%	4.956	0.495
N-04	6042.3	19%	4.811	0.481
N-05	6068.0	16%	3.785	0.378
N-06	7795.1	14%	1.865	0.186
N-07	7481.3	18%	4.537	0.454
N-08	6622.5	15%	7.357	0.736
N-09	8547.0	11%	6.981	0.699
N-10	8086.3	18%	3.654	0.365

Fuente: Autores.



Gráfica 6. Velocidad vs resistencia

Fuente: Autores.

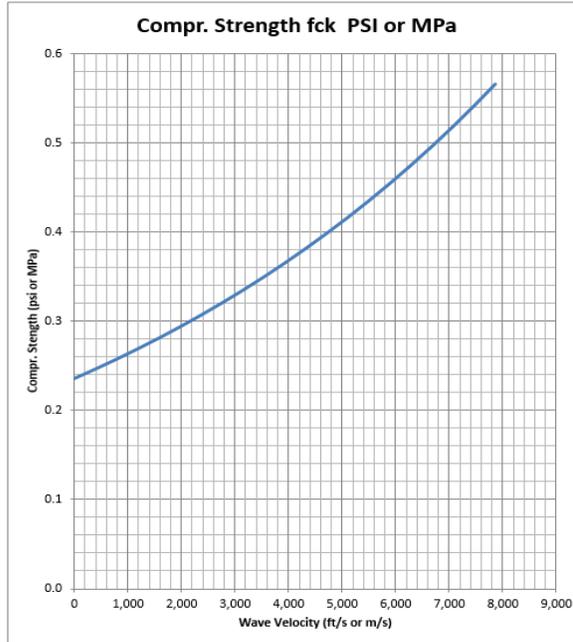
Al no identificar una tendencia definida entre los datos obtenidos, se optó por realizar un ajuste en otro medio. Se empleó una hoja de cálculo programada para el ajuste de datos para este tipo de ensayos que venía junto con el equipo de ultrasonido marca “proceq”, y luego de ingresar los valores de velocidades de onda en m/s y las resistencias en Mpa, se obtuvo una curva ajustada (ver Gráfica 7).



**TABLE 2**

Curve Points	Pundit Values Velocity V	Compr. Strength fck
	ft/s or m/s	PSI or MPa
Lowest	7,853	0.6
	7,460	0.5
	7,068	0.5
	6,675	0.5
	6,282	0.5
	5,890	0.5
	5,497	0.4
	5,104	0.4
	4,712	0.4
	4,319	0.4
	3,927	0.4
	3,534	0.3
	3,141	0.3
	2,749	0.3
	2,356	0.3
	1,963	0.3
	1,571	0.3
	1,178	0.3
	785	0.3
	393	0.2
Highest	0	0.2

Conversion Curve  $f_c = 0.23504 * V^{0.000112}$



Gráfica 7. Correlación entre resultados de velocidades de onda en m/s y Resistencia en Mpa en hoja de cálculo Fuente: Proceq.

Teóricamente entre mayor sean las velocidades de ondas, mayor será la resistencia del material a ensayar y las curvas que resultan de esta relación suelen tener una tendencia exponencial, sin embargo, estas relaciones no se aprecian en los datos encontrados, ya que una de las muestras que obtuvo mayor velocidad de onda como lo es la N-10, su resistencia resulto ser una de las más bajas, por esta misma razón, para fines de encontrar una curva más definida se sacaron los valores de N-01, N-02 y N-10.

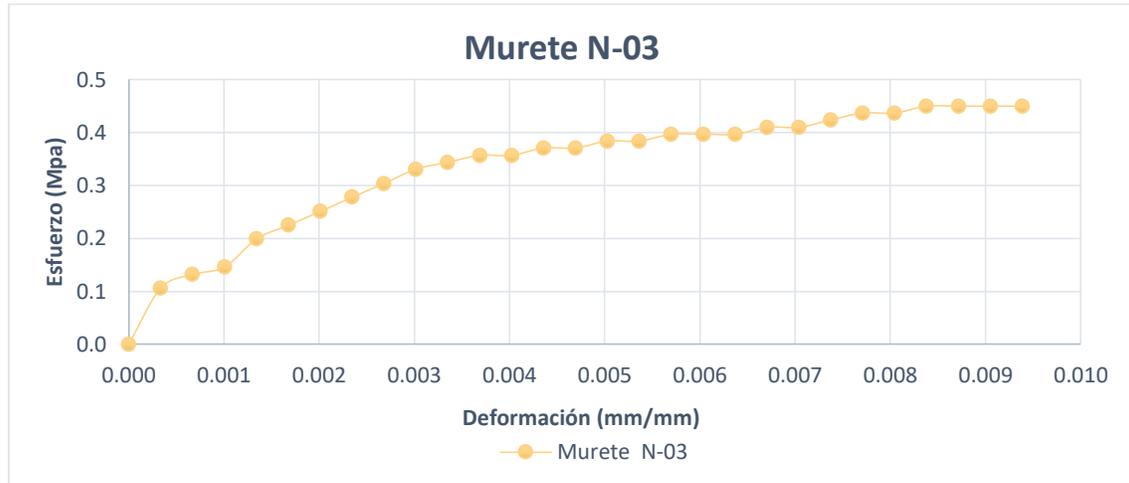
### 5.10 Gráficas esfuerzo – deformación muretes no reforzados

Luego de ensayos los muretes a compresión, se graficó el comportamiento de cada uno de ellos durante la prueba, en las cuales se observan las zonas elásticas, inelásticas y puntos de fallas. A continuación, se muestran las gráficas antes mencionadas para los muretes que se

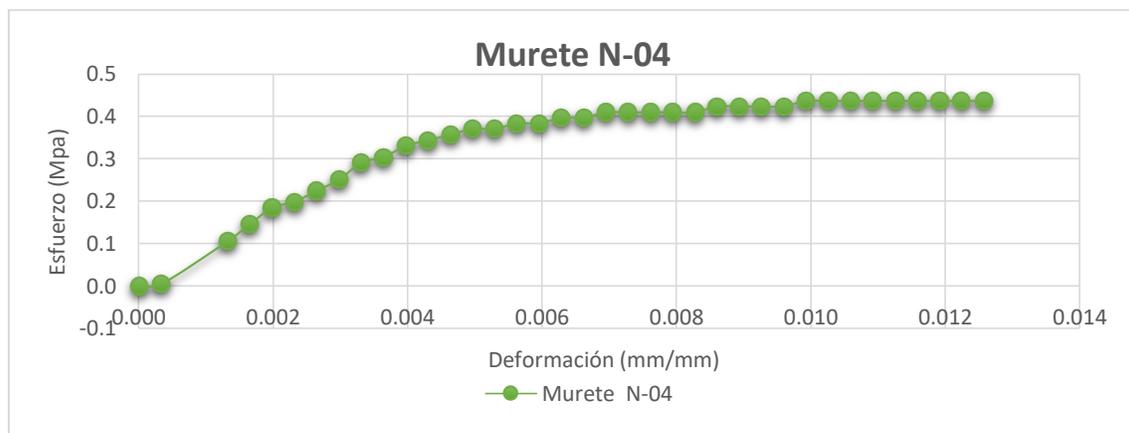


incluyeron en el valor de resistencia promedio. Las demás gráficas se pueden observar en Anexo

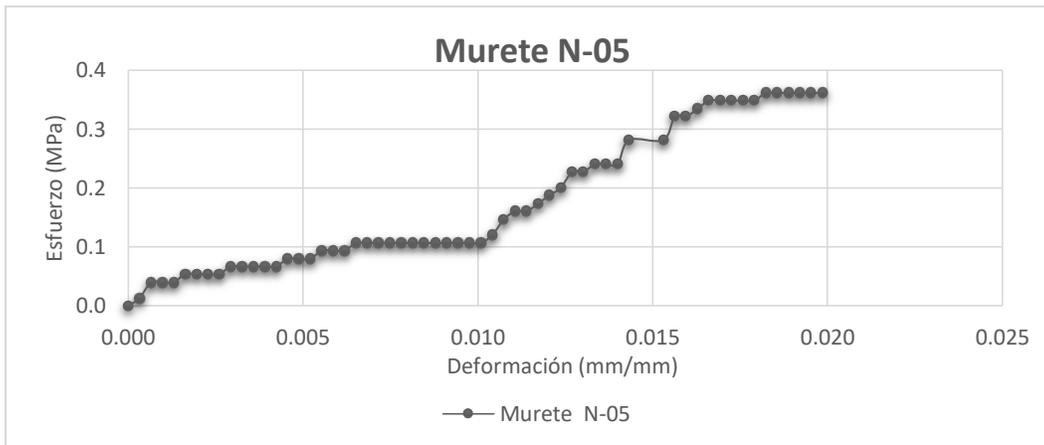
9.



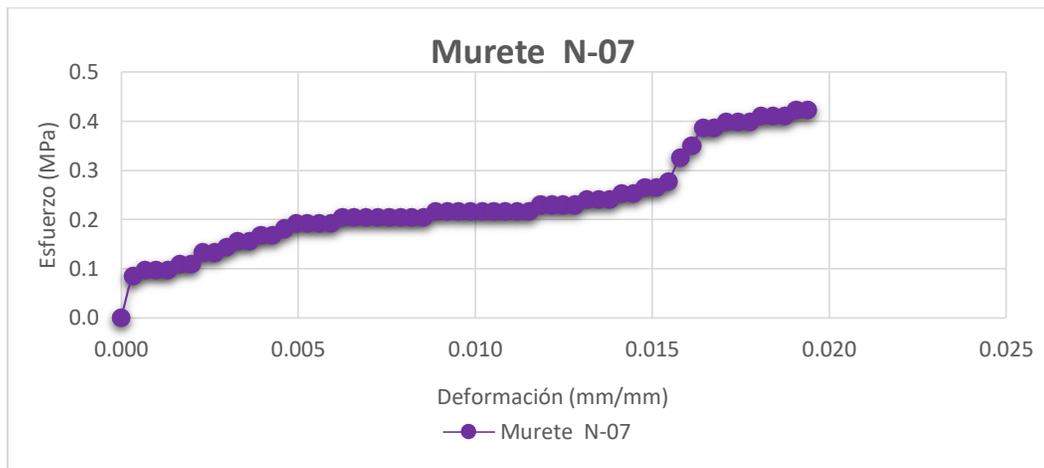
Gráfica 8. Esfuerzo/deformación. Murete N-03  
Fuente: Autores.



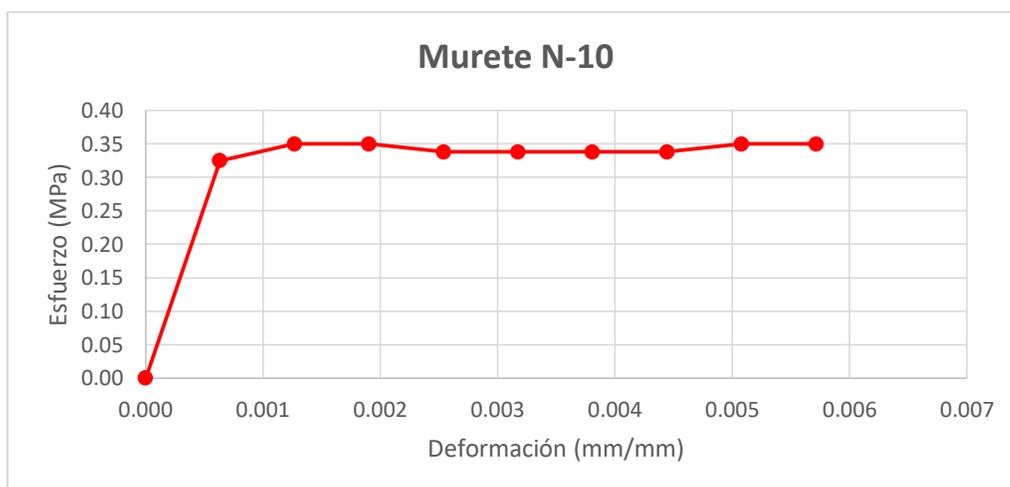
Gráfica 9. Esfuerzo/deformación. Murete N-04  
Fuente: Autores.



Gráfica 10. Esfuerzo/deformación. Murete N-05  
Fuente: Autores.



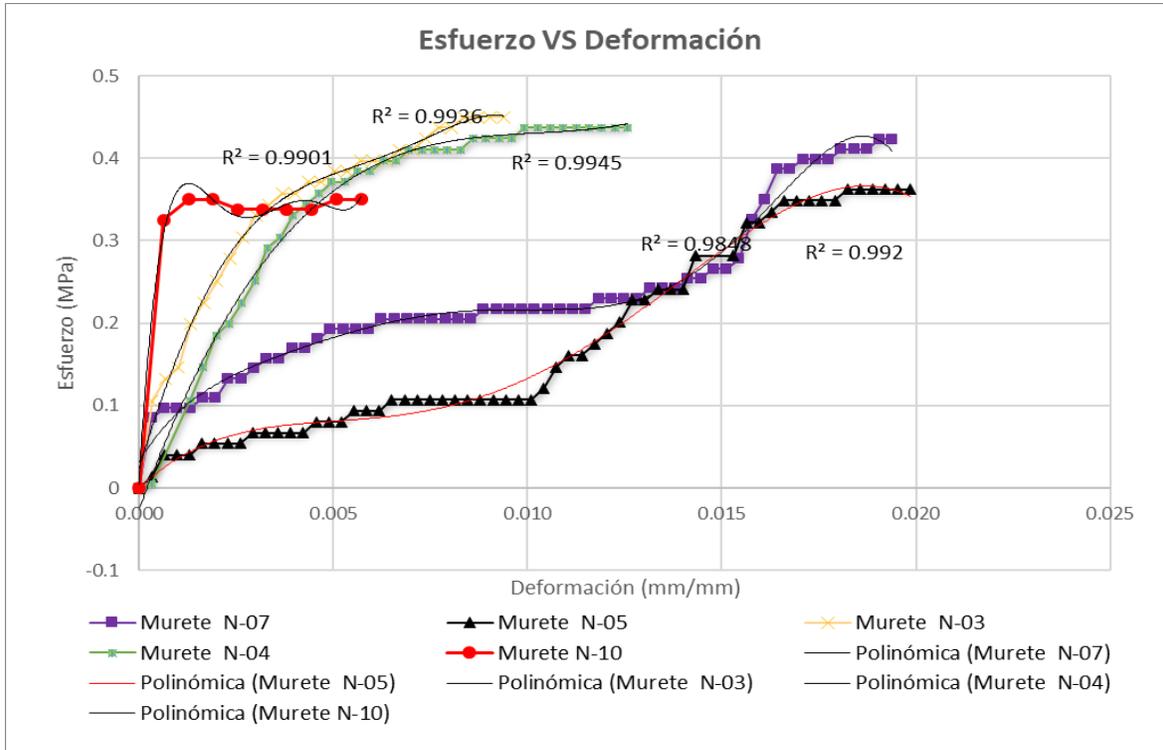
Gráfica 11. Esfuerzo/deformación. Murete N-07  
Fuente: Autores.



Gráfica 12. Esfuerzo/deformación. Murete N-09  
Fuente: Autores.



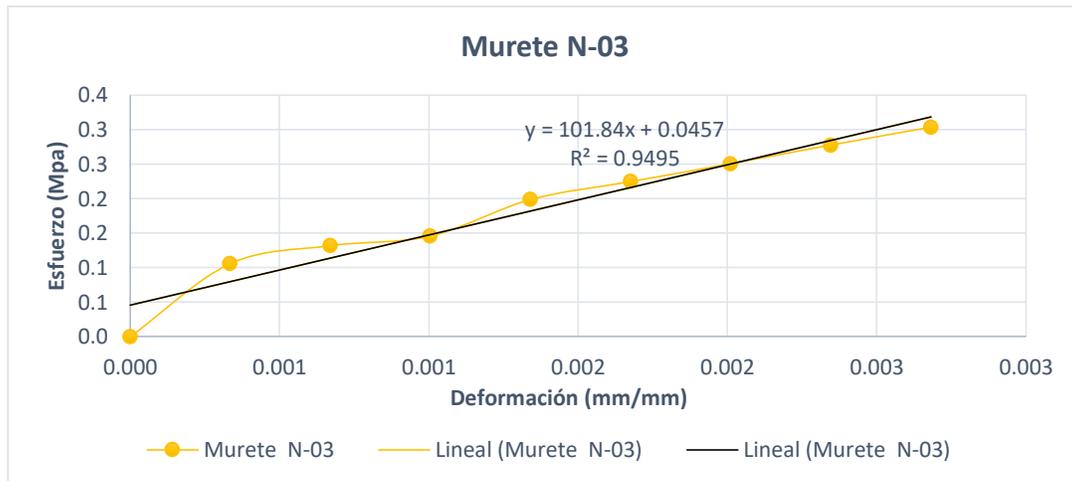
Fuente: Autores.



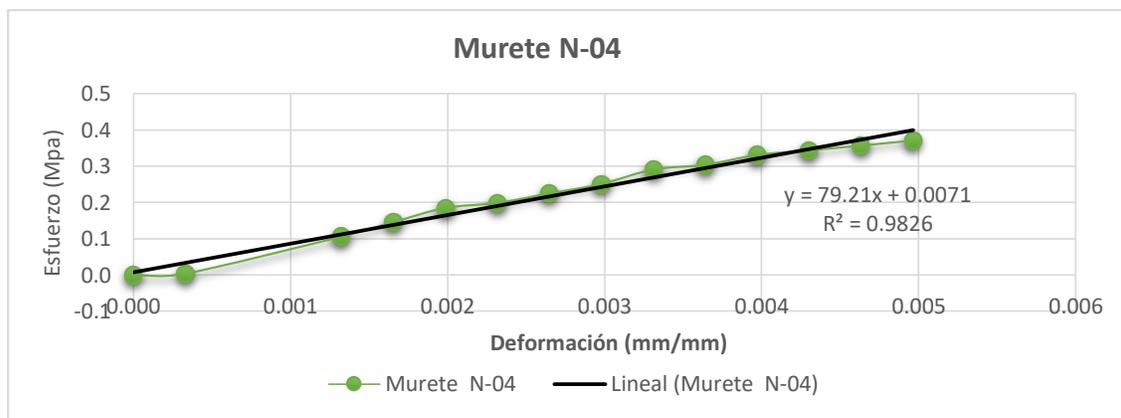
Gráfica 13. Esfuerzo/Deformación ajustadas polinómicamente. Muretes N-03, N-04, N-05, N-07, N-10. Fuente: Autores.

Además del comportamiento de los muretes, por medio de las gráficas se puede determinar el módulo de elasticidad de cada uno de los especímenes, determinando la zona elástica y hallando la pendiente de ésta. Este valor será comparado con el valor resultante de la ecuación D.5.2-3 especificado en el capítulo D sección 5.2.1.2 del Reglamento Técnico Colombiano NSR-10.

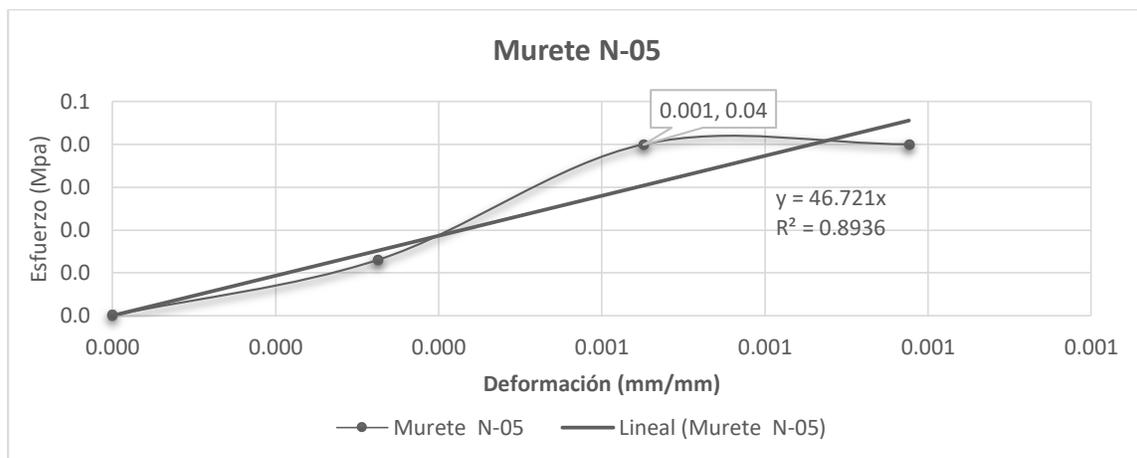
$$E_m = 750f'm \leq 20000MPa \quad D.5.2 - 3$$



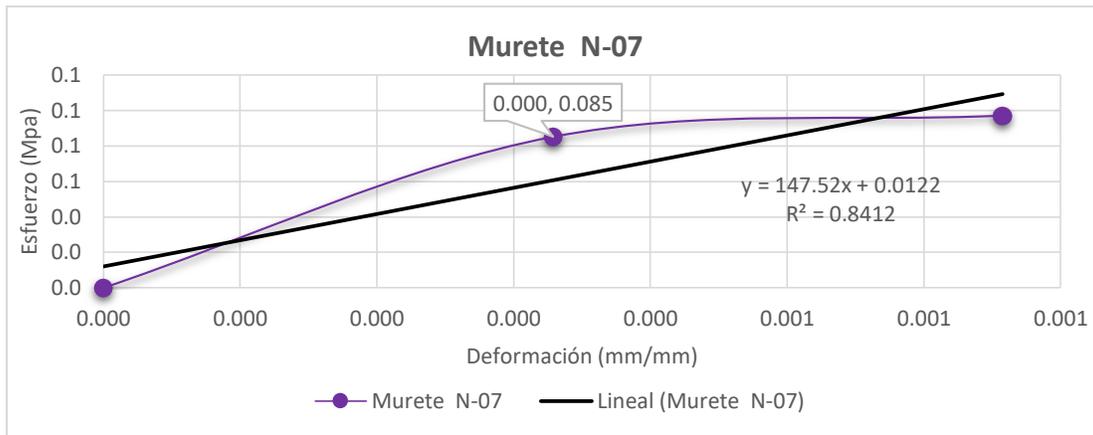
Gráfica 14. Determinación del módulo de elasticidad murete N-03.  
Fuente: Autores.



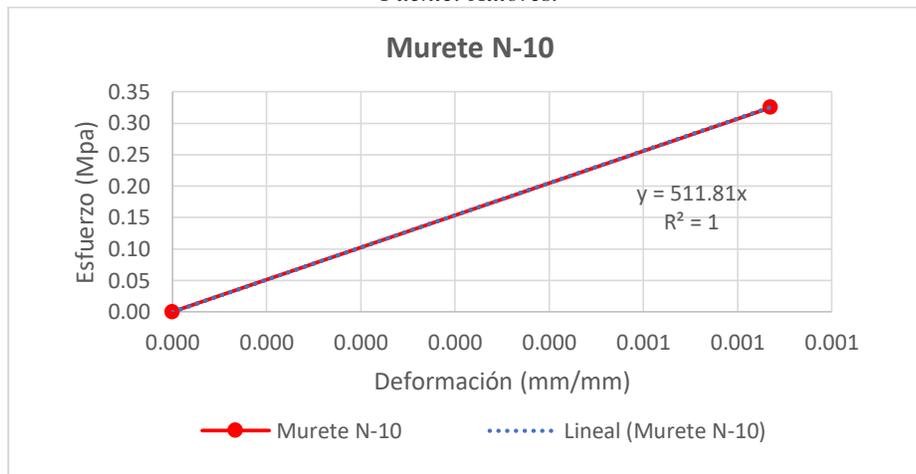
Gráfica 15. Determinación del módulo de elasticidad murete N-04.  
Fuente: Autores.



Gráfica 16. Determinación del módulo de elasticidad murete N-05.  
Fuente: Autores.



Gráfica 17. Determinación del módulo de elasticidad murete N-07.  
Fuente: Autores.



Gráfica 18. Determinación del módulo de elasticidad murete N-09.  
Fuente: Autores.

A continuación, en la Tabla 19 se presenta un resumen de los valores obtenidos para módulo de elasticidad por ambos métodos. Se puede notar que el murete número 7 tuvo un mayor desfase en el resultado del módulo de elasticidad calculado producto del ensayo de laboratorio en comparación con los demás muretes que sus resultados no superaba los  $800 \text{ kg/cm}^2$ , esto se puede observar en su gráfica de esfuerzo-deformación donde inicialmente tuvo un cambio abrupto en la lectura que no permite una mejor tendencia en la parte elástica de la gráfica. Por otro lado, el murete numero 10 obtuvo un valor aún mayor en su módulo de elasticidad incluso aun mayor que el valor obtenido a través de la ecuación propuesta en la NSR-10 para su cálculo, este valor elevado



es atribuido a las pocas lecturas de deformación tomadas, resultado una pendiente pronunciada producto de la conexión únicamente de dos puntos.

Es pertinente recordar que el módulo de elasticidad corresponde a la pendiente de la región elástica de la gráfica donde el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria.

Tabla 19. Módulo de elasticidad de muretes N-03, N-04, N-05, N-07, N-09.

Murete	Según NSR-10		Según laboratorio	Variación
	Módulo de elasticidad (Mpa)	Módulo de elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> )	
N-03	371.250	3717.144	1155.593	0.689
N-04	360.750	3608.287	762.079	0.789
N-05	284.250	2839.077	626.272	0.779
N-07	340.500	3402.559	2636.406	0.225
N-10	273.750	2740.500	5219.039	-0.904
Promedio	326.100	3261.513	2079.878	0.316

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores dados por la NSR-10 y los obtenidos en el laboratorio tienen diferencias en promedio del 50-60%. En investigaciones pasadas como la de (Acuña, 2018) y (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016) también se encontró una variación muy marcada entre un método y otro por lo que se concluyó que los parámetros establecidos en el Reglamento Técnico Colombiano NSR-10 no tienen aplicación a la mampostería colonial aplicada en los muretes.

Cabe resaltar que para la toma de las lecturas de las deformaciones en los muros se hicieron a través de un deformímetro adaptado a una máquina universal lo que se traduce en algo muy manual y rústico donde se pueden ver inmersos errores. Para contrarrestar esta situación, es



necesario que se empleen equipos modernos o deformímetros digitales que arrojen valores más precisos.

### 5.11 Resultado y análisis de ensayo de compresión simple a muretes reforzados.

El resultado de la prueba de compresión simple a los muretes reforzados es determinante para analizar si la malla electro-soldada es efectiva y cumple su objetivo de reforzar y mejorar la capacidad de carga de los muretes para así considerarse su uso en la restauración de edificaciones patrimoniales donde se encuentre este tipo de mampostería.

A continuación, se muestran imágenes de donde se hará un análisis del comportamiento de los muretes al ser sometidos a cargas axiales durante el ensayo de compresión simple en la máquina universal.



*Ilustración 34. Falla muretes reforzados con anclaje y estado luego de ser bajado de la máquina universal. Fuente: Autores.*



En la Ilustración 34 se observa la falla típica que se presentó en los muretes, como se realizó un anclaje de las mallas electro-soldadas a los muretes, al fallar se presentó un agrietamiento vertical que comenzó en la parte inferior del espécimen. No hubo desprendimiento del refuerzo, por lo que se puede verificar que este se encontró anclado correctamente.

De igual manera, luego de ser bajados de la máquina, no hubo una descomposición completa del murete, sino que el mortero de recubrimiento y la malla contuvieron todo el material del centro y no permitió que se deshiciera completamente. En la Ilustración 34 se pueden observar los puntos donde se ancló la malla electro-soldada. El hecho de que los muros no se desarmaran totalmente es un buen indicador debido a que no fallan muy explosivamente, condición que genera mayor seguridad en las casas coloniales.

Sin embargo, también es posible observar que la parte externa del refuerzo y el mortero PLANITOP HDM RESTAURO quedó intacto completamente, esto se debe a que la malla tiene una resistencia mucho mayor a la de la matriz. Es recomendable, usar una cuantía menor de acero (no menor a la cuantía mínima estipulada por la NSR-10) para que haya un comportamiento más uniforme entre el murete y la malla electro-soldada.

Esta conducta se presentó también en la investigación titulada “*Análisis comparativo de resistencias a la compresión en muros de mampostería por medio del uso de fibras de carbono y basalto para procesos de restauración y conservación*” en donde los materiales constituyentes de los especímenes fallaron primero que el refuerzo realizado en el murete utilizando CFRP y BFRP (Acuña, 2018).



Tabla 20. Resultados de Resistencia a la compresión en muretes reforzados con malla electro-soldada.

Autor		July Pauline Devoz Díaz		Lugar	GEOCONSULTAS LTDA		
		Laura Cristina Terán Simancas					
Descripción		Muretes de mampostería colonial reforzados					
Ensayo		Resistencia a la compresión					
Murete	Carga Maxima (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia experimental (Kg/cm <sup>2</sup> )	Factor de corrección	Resistencia corregida (Mpa)	Resistencia corregida (Kg/cm <sup>2</sup> )
E-01	31.00	84037.50	840.38	3.689	1.050	0.039	3.873
E-02	31.00	84037.50	840.38	3.689	1.046	0.386	3.859
E-03	115.00	91687.50	916.88	12.543	1.021	1.281	12.810
E-04	88.00	83580.88	835.81	10.529	1.049	1.104	11.045
E-05	64.00	95325.00	953.25	6.714	1.019	0.684	6.841
E-06	105.00	95175.00	951.75	11.032	1.013	1.118	11.178
E-07	80.00	95762.50	957.63	8.354	1.021	0.853	8.532
E-08	98.00	89140.63	891.41	10.994	1.029	1.131	11.310
E-09	101.00	89333.75	893.34	11.306	1.027	1.162	11.616
E-10	103.00	88550.00	885.50	11.632	1.029	1.196	11.965
Promedio 1	81.60	<b>Rango</b>	102.000	-	61.200		10.662
Promedio 2	95.14						11.423

Fuente: Autores.

En la tabla 19 se encuentran plasmados los valores de resistencia obtenidos luego del ensayo a compresión de los muretes reforzados. Para el cálculo del valor de resistencia promedio se empleó la misma distribución estadística que para los no reforzados (t Student), con una confiabilidad del 95% el intervalo entre el cual se eligió los valores fue de  $9.15 < \mu < 12.46$ , observándose en la tabla que los valores que no se encuentran subrayados de ningún color fueron los empleados en el promedio. En esta ocasión solo se tuvo en cuenta para el análisis estadístico del murete E-03 al E-10, debido a que los dos muretes iniciales (subrayados en color rojo) dieron resistencias muy bajas en comparación a los demás a causa de que al momento de ser ensayados la platina que se empleó no estaba abarcando en su totalidad la superficie donde se estaba aplicando la carga por tanto no se estaba transmitiendo adecuadamente los esfuerzos al refuerzo en estudio,



por tanto al momento de notarse esto se hizo el cambio por una diferente con mayores dimensiones y los resultados fueron más favorables.

Luego de identificar los valores que se encontraban en el rango posterior al análisis estadístico, se obtuvo un valor de resistencia promedio de  $11.42 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1.14 \text{ Mpa}$ ) el cual corresponde al promedio 2, sin embargo, se realizó el promedio total de todos los datos obteniendo un valor de  $10.66 \text{ Kg/cm}^2$ , observándose que aquí radica la importancia del ensayo de varias muestras, para obtener datos más certeros. De los resultados de resistencia de los muretes reforzados se obtuvo un incremento de  $162.5\%$  del valor de los no reforzados, es decir más del doble, lo que indica que el refuerzo empleado si le está aportando mejores propiedades al muro desde el punto de vista de la resistencia. La implementación de este refuerzo también mostro un incremento en investigaciones como “Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas” (Morales, 2018) donde se obtuvo un incremento del  $43\%$  para muretes de unidad y media en bloques de arcilla recocidos, evidenciando que a pesar de que fue menor al obtenido en esta investigación, se evidencia un incremento por parte del refuerzo empleado, sin embargo se debe tener en cuenta que no se trata de la misma mampostería, por tanto los resultados difieren a los obtenidos en la presente investigación, con un valor de  $4.6 \text{ MPa}$ . Por otro lado, también se puede decir que el mortero de recubrimiento empleado para la malla fue de gran ayuda para aumentar la resistencia en los muretes y contribuir a que el refuerzo se comportara mejor, debido a que por sí solo tiene una resistencia mayor a  $15 \text{ MPa}$  a los 28 días según lo estipulado en la ficha técnica del mismo.



Tabla 21. Matriz de resumen resultados de investigación.

Mampostería	Resistencia a compresión en MPa				
	Resultado obtenido	Investigación 1 (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016)	Investigación 2 (Acuña, 2018)	Investigación 3 (Morales, 2018)	Norma Italiana NTC 2008
<b>Sin reforzar</b>	0.44	0.47	0.37	3.2	1-1.8
<b>Reforzada</b>	1.14		0.5/0.53	4.6	
<b>Características</b>	Murete compuesto por roca caliza, coralina y ladrillo tolete. Refuerzo-malla electro-soldada	Murete compuesto por roca caliza, coralina y ladrillo tolete. Refuerzo-ninguno	Murete compuesto por roca caliza, coralina y ladrillo tolete. Refuerzo- fibra de carbono/fibra de basalto	Murete compuesto por ladrillo recocido de arcilla y mortero de cal. Refuerzo-malla electro-soldada	Muratura in pietrame disordinata( ciottoli, pietre erratiche e irregolari)

Fuente: Autores.

En la Tabla 21 se encuentra consignado de manera resumida los resultados más importantes de la investigación, comparados con otros estudios ya mencionados anteriormente los cuales son:

Investigación 1: *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 & Gamarra Torres, 2016).

Investigación 2: *“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, 2018)

Investigación 3: *“CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE MORTERO DE CAL Y ARENA ,*



*COMPATIBLES CON MORTEROS” (Morales, 2018)*

A su vez, se comparan estos resultados con la norma Italiana NTC 2008 ya que esta, en particular, presenta estructuras compuestas por materiales calcáreos ubicados de manera desordenada ocasionando así una matriz anisotrópica, además en la tabla se encuentran brevemente las características generales de cada uno de los tipos de muretes estudiados dentro de cada investigación.

Como se puede ver, los muretes sin reforzar del presente estudio y los de (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016) y (Acuña, 2018) presentan un valor de resistencia a la compresión muy similar, esto debido a que fueron construidos con características muy similares, sin embargo, es un valor muy bajo en comparación con (Morales, 2018) y la NTC 2008. La discrepancia radica principalmente en la composición de los especímenes debido a que en la investigación 3 se utilizó un murete construido con ladrillo recocido de arcilla, se puede analizar entonces que un murete con esta característica posee mejor comportamiento a la compresión que los realizados en este trabajo.

Igualmente, se comparó los muretes reforzados, partiendo de que en cada estudio se utilizó un refuerzo diferente, a excepción de la investigación 1 y la norma NTC 2008 que no plantean valores para mampostería reforzada. En este caso, se observa que en la investigación 3 el refuerzo de malla electro-soldada permitió que la resistencia a la compresión aumentara en un 43%, mientras que en la presente se aumentó en un 162.5%, esta diferencia pudo ser causada por la calidad del mortero en donde se embebió el refuerzo, ya que en el caso del presente estudio se utilizó uno a base de cal hidráulica y eco-puzolana, elaborado por la empresa MAPEI de elevada ductilidad. Además, en comparación con la investigación 2 cuyo refuerzo fue compuesto por fibra

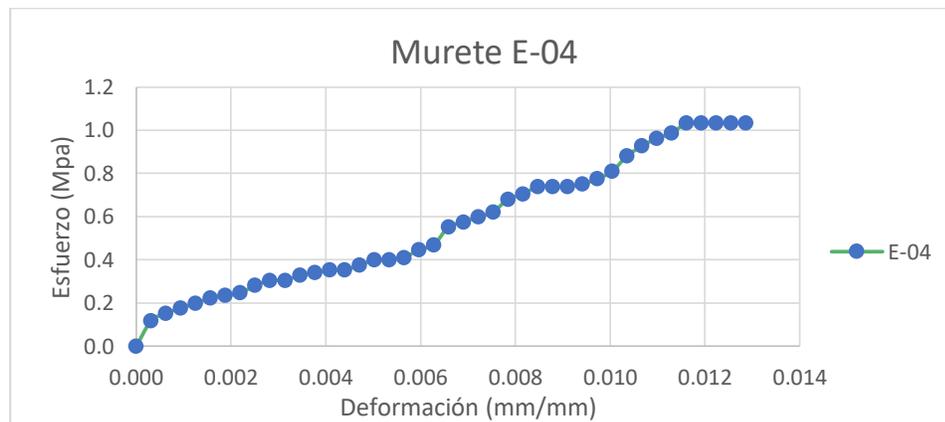


de carbono y fibra de basalto se analiza que probablemente tiene un mejor comportamiento la malla electrosoldada que los anteriormente mencionados.

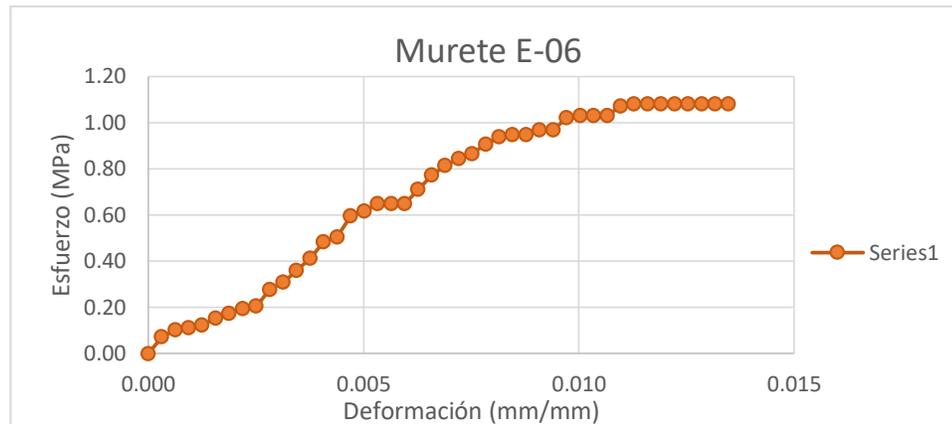
Sin embargo, es posible admitir que se vuelve necesario realizar más investigaciones que comparen este parámetro (resistencia a la compresión) utilizando el mismo tipo de refuerzo (malla electrosoldada) para comprobar los resultados obtenidos en la presente investigación.

### 5.12 Gráficas esfuerzo – deformación muretes reforzados

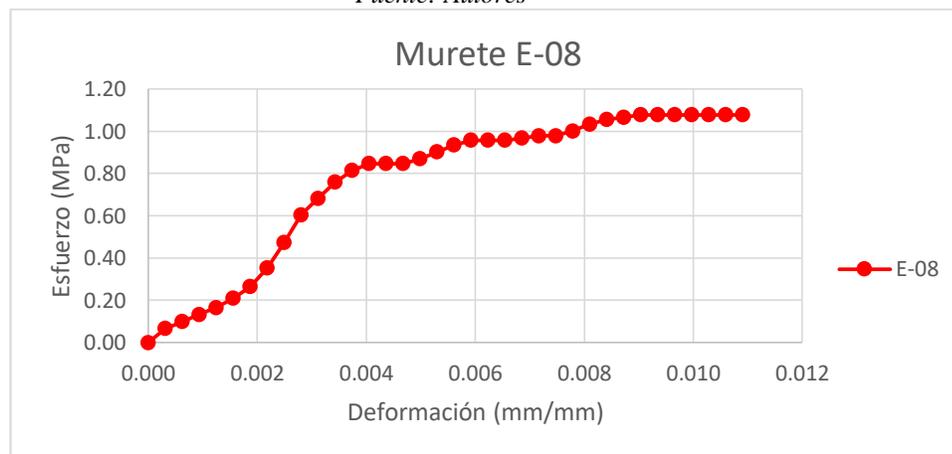
A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo-deformación de los muretes reforzados con malla electro-soldada que fueron tomados para el cálculo de la resistencia promedio a partir del análisis estadístico, en estas se pueden observar zonas elásticas, inelásticas y puntos de falla. Las demás curvas se encuentran consignadas en el Anexo 9.



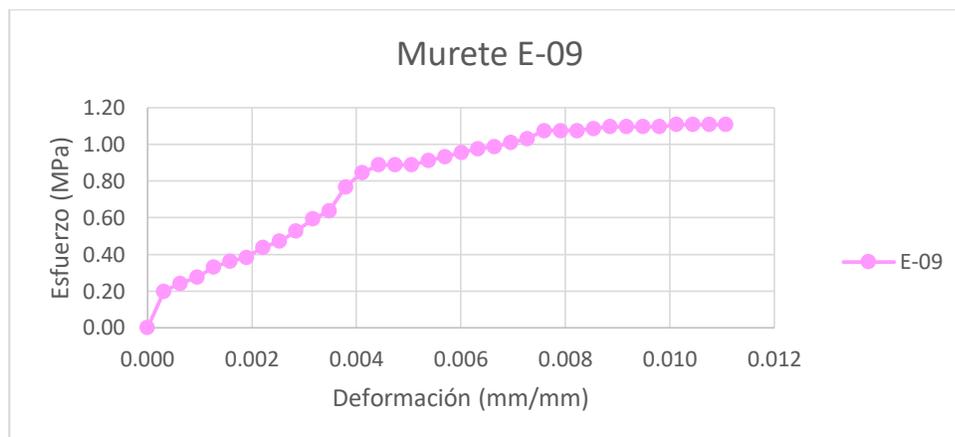
Gráfica 19. Esfuerzo/deformación Murete E-04  
Fuente: Autores



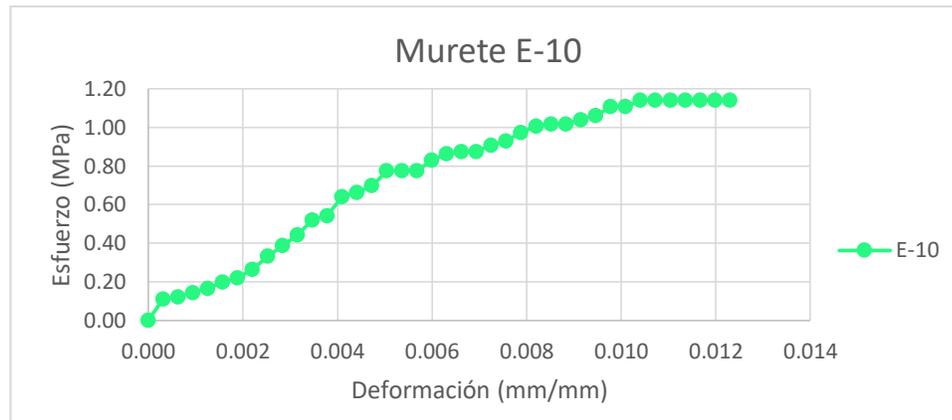
Gráfica 20. Esfuerzo/deformación Murete E-06  
Fuente: Autores



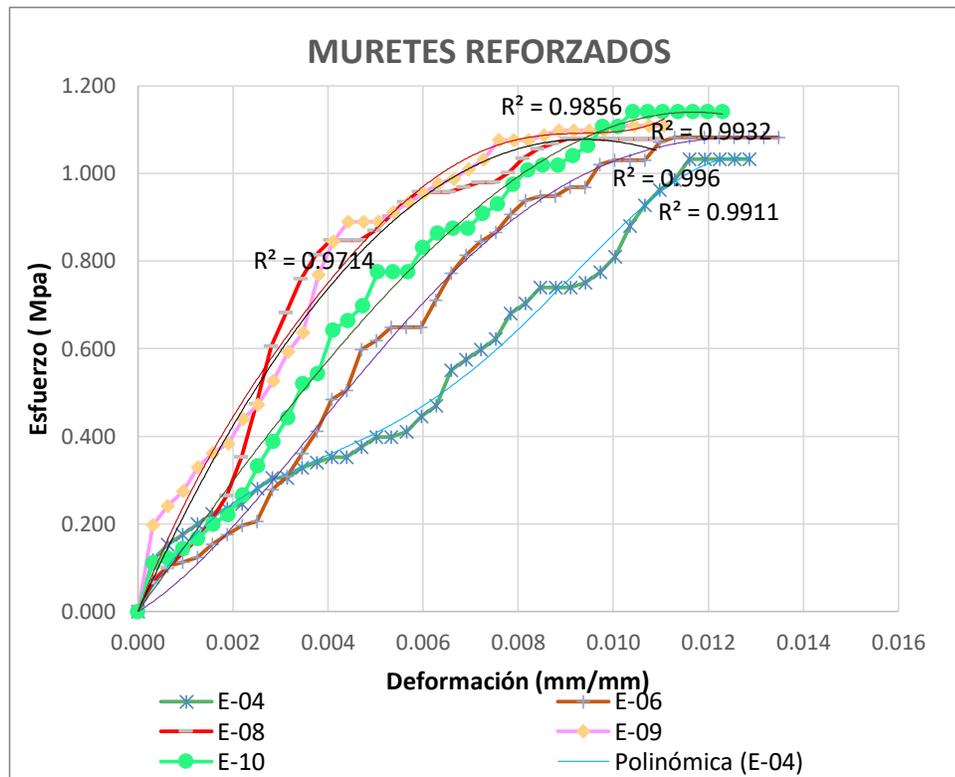
Gráfica 21. Esfuerzo/deformación Murete E-08  
Fuente: Autores



Gráfica 22. Esfuerzo/deformación Murete E-09  
Fuente: Autores



Gráfica 23. Esfuerzo/deformación Murete E-10  
Fuente: Autores



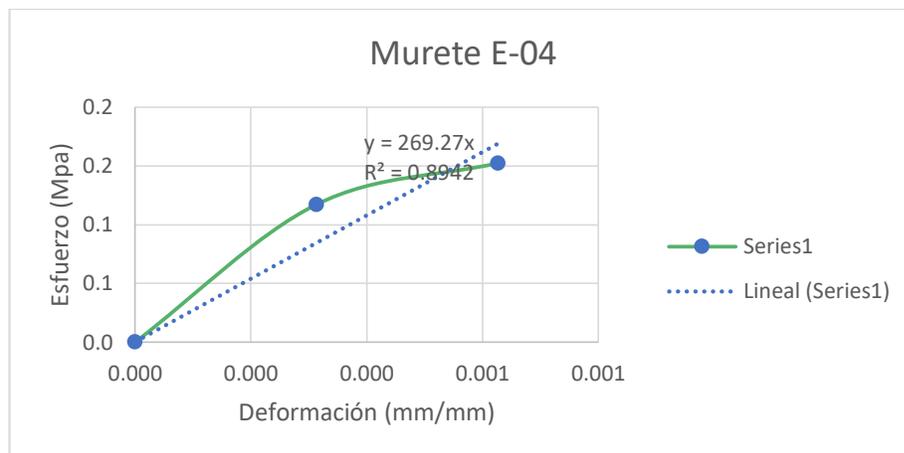
Gráfica 24. Esfuerzo/Deformación ajustadas polinómicamente. Muretes E-04, E-06, E-08, E-09, E-10.  
Fuente: Autores.

De las anteriores gráficas se puede ver que los muretes presentaron un mejor comportamiento en los muretes reforzados en comparación con los muretes no reforzados. Esto, puede deberse al elemento de acero ya que este material tiene un comportamiento dúctil, lo que

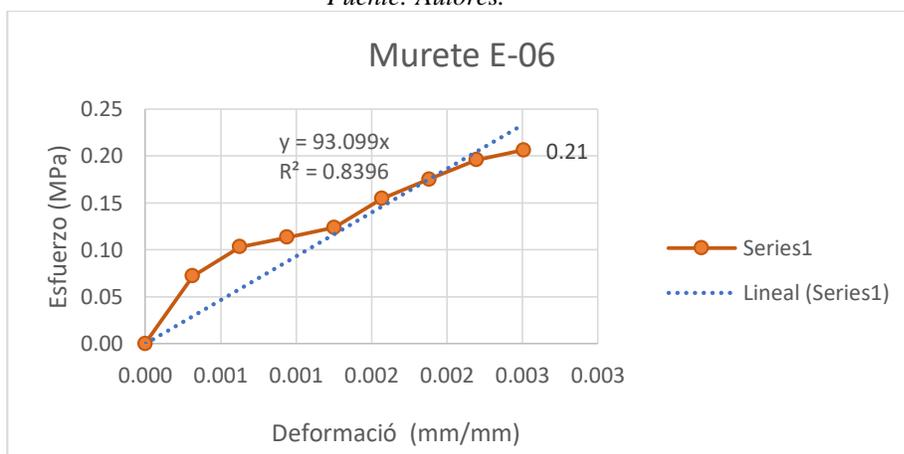


permite mayores deformaciones al igual que mayores esfuerzos que el concreto colonial. Es una condición positiva debido a que en el momento en que la falla no es explosiva y esto contribuye a la seguridad de las viviendas.

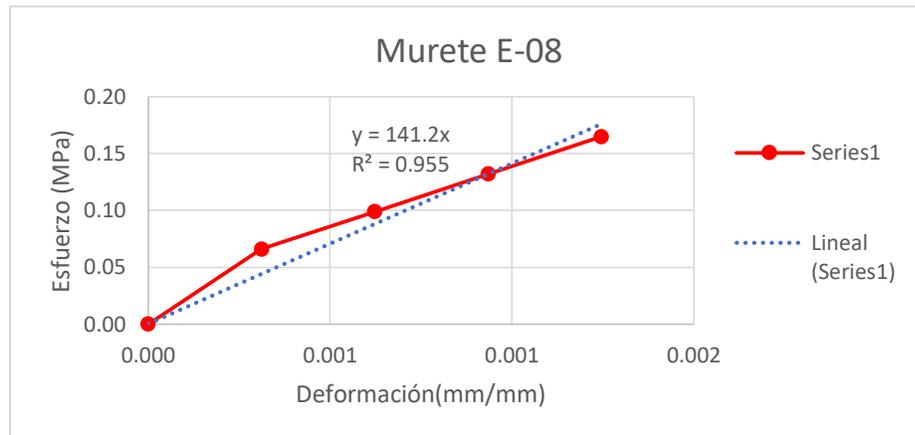
Además, se determinaron los módulos de elasticidad de igual manera como se hizo con los muretes no reforzados a partir de la pendiente de la zona elástica de la gráfica esfuerzo-deformación de los muretes correspondientes.



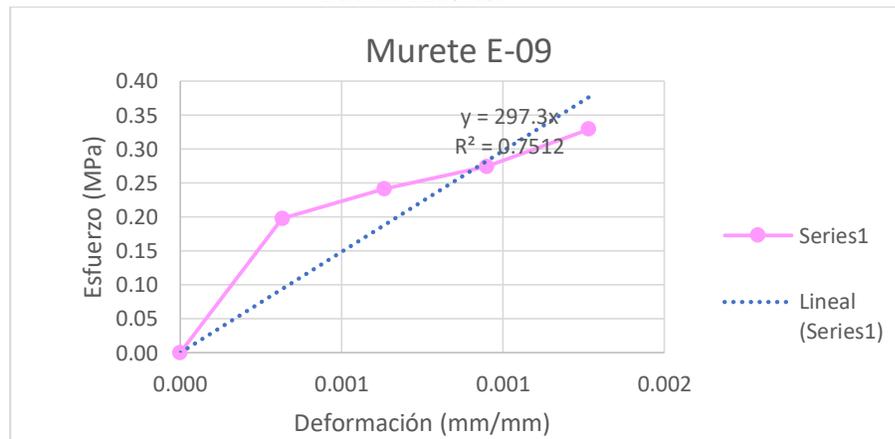
Gráfica 25. Determinación del módulo de elasticidad murete E-04.  
Fuente: Autores.



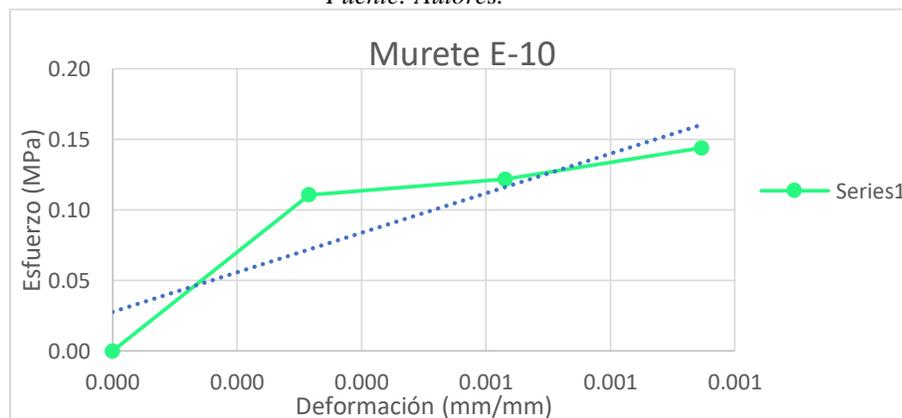
Gráfica 26. Determinación del módulo de elasticidad murete E-06.  
Fuente: Autores.



Gráfica 27. Determinación del módulo de elasticidad murete E-08.  
Fuente: Autores.



Gráfica 28. Determinación del módulo de elasticidad murete E-09.  
Fuente: Autores.



Gráfica 29. Determinación del módulo de elasticidad murete E-10.  
Fuente: Autores.



En la Tabla 22 se presentan un resumen de los valores obtenidos para módulo de elasticidad por ambos métodos. Se puede notar que todos los datos tienen valores muy similares y oscilan entre 800 MPa y 900 MPa lo que se traduce en módulos elásticos muy uniformes.

Es pertinente recordar que el módulo de elasticidad corresponde a la pendiente de la región elástica de la gráfica donde el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, es por esto que los valores de E para los muretes reforzados son mayores a los no reforzados, como la deformación unitaria es mayor, igualmente el módulo de elasticidad es mayor y está relacionado con los materiales, en este caso también es mayor gracias al acero de refuerzo que se le añadió al murete.

Tabla 22. Módulo de elasticidad de muretes reforzados con malla electro-soldada.

Murete	Según NSR-10		Según laboratorio	Variación
	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (Kg/cm <sup>2</sup> )	
E-04	828.347	8283.474	2478.810	0.701
E-06	838.338	8383.381	1052.247	0.874
E-08	848.287	8482.866	1710.062	0.798
N-09	871.191	8711.908	2636.406	0.697
N-10	897.371	8973.705	1998.886	0.777
Promedio	856.707	8567.067	1975.282	0.769

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores dados por la NSR-10 y los obtenidos en el laboratorio tienen diferencias en promedio del 70%, esto ocurre ya que los parámetros establecidos en el Reglamento Técnico Colombiano NSR-10 están adaptados a los materiales empleados en las construcciones contemporáneas a base de concreto con cemento, a diferencia de la mampostería estudiada, la cual tiene una composición distinta en cuanto a



agregados por tanto es necesario la elaboración de más ensayos al respecto que permita establecer una ecuación patrón para la misma.

Cabe resaltar que para la toma de las lecturas de las deformaciones al igual que en los muretes no reforzados, se hicieron a través de un deformímetro adaptado a una máquina universal lo que se traduce en algo muy manual y rústico donde se pueden ver inmersos errores. Para contrarrestar esta situación, es necesario que se empleen equipos modernos o deformímetros digitales que arrojen valores más precisos.



## 6. CONCLUSIONES

Al momento de analizar la mampostería colonial es de suma importancia conocer las propiedades de los materiales que constituyen a ésta como un todo porque arroja un conocimiento del comportamiento y calidad de la mezcla y de que tanto puede verse afectada la mampostería a causa de alguno de sus componentes.

Es por este motivo que se realizaron estudios a las rocas constituyentes de esta mampostería y se obtuvo así un porcentaje de desgaste aceptable para la roca caliza de 39.9% lo cual se traduce en una mejor calidad y por tanto un mejor comportamiento ante la abrasión, estando expuestas a roce, a diferencia de la roca coralina que presentó un desgaste más elevado del 58.85%, siendo más blanda. Del ensayo de consistencia realizado a la cal se puede notar la capacidad de absorción que tiene la cal en comparación con el cemento obteniendo un valor de 47.8% siendo casi el doble que el que posee el cemento (23% - 33%), además de resaltar su lento fraguado de 3 días, 1 hora y 44 minutos en relación al resultado promedio obtenido para el cemento que es entre 45 minutos a 1 hora (Gaspar-Tébar, 1980). Estos resultados se encuentran en concordancia con investigaciones realizadas anteriormente como la de (Acuña, 2018) quien obtuvo que el porcentaje de desgaste para la roca caliza era de 39.24% y para la roca coralina de 57.26%. Adicionalmente, el ensayo de consistencia normal dio 48% y el fraguado se obtuvo en 330 minutos, esta diferencia en tiempo puede ser debido a que en la investigación mencionada se usó cal semihidratada y en este estudio hidratada, sin embargo, se mantiene un valor muy por encima del obtenido en el cemento. De igual modo, los resultados de resistencia para el mortero de pega siguen siendo bajos en la proporción 1:2. Por tanto, se puede deducir que la cal hidratada no resulta la más apropiada por si sola para



realizar intervenciones en obras patrimoniales, sino que se deben considerar muchos más factores para obtener mejores resultados y analizar las diferencias químicas entre los diversos tipos de cal.

El mortero de pega que conforma la matriz en los muros de mampostería, constituye un material determinante en la resistencia del murete, ya que fue el desencadenante en la falla del mismo, en vista de que, durante el ensayo de resistencia a la compresión de los muretes sin reforzar, estos se caracterizaron por presentar una falla longitudinal en la argamasa rodeando los demás materiales constituyentes del espécimen.

A través del ensayo de resistencia se construyeron las curvas esfuerzo deformación de donde fue posible determinar experimentalmente el módulo de elasticidad obteniéndose un valor promedio de  $2079.87 \text{ kg/cm}^3$  y por otro lado empleando la ecuación D.5.2-3 de la NSR-10 se calculó dicho modulo teóricamente con valor de  $3261,51 \text{ kg/cm}^3$ , representando aproximadamente entre un 56% más que el valor calculado experimentalmente, esta misma situación se presentó en estudios realizados por (Acuña, 2018) y (Camargo Bocanegra & Gamarra Torres, 2016) en donde el modulo teórico era casi el doble del experimental y es así como observando la gran diferencia en estos valores se deduce que esta relación establecida en la norma para el cálculo del módulo de elasticidad no aplica para la mampostería en estudio (colonial tipo I), debido a que está establecida a partir de los materiales convencionales de la construcción. Además al realizar el ensayo de resistencia a la compresión a muretes no reforzados se halló una resistencia promedio de  $4.35 \text{ Kg/cm}^2$  ( $0.43 \text{ MPa}$ ) mientras que para los muretes reforzados esta resistencia aumentó en un 162.5% dando como resultado una resistencia de  $11.423 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1.14 \text{ MPa}$ ), esto indica que este tipo de refuerzo si es viable para ser empleado en estructuras patrimoniales para efectos de restauración junto con el mortero a base de cal usado PLANITOP HDM RESTAURO el cual



ayudó en gran medida al aumento de la resistencia, igualmente permite que el muro respire y contiene puzolanas que no reaccionan con los cloruros por lo que evita reacciones de eflorescencia. El aporte de este tipo de refuerzo también se ve evidenciado en investigaciones como la de (Morales, 2018) donde obtuvo un incremento del 43% en la resistencia a la compresión para la mampostería que estudiaban, de unidad y media con bloques recocidos de arcilla y por otro lado el mismo autor empleando muros medianos obtuvo un resultado menos favorable ya que no logró que la resistencia aumentara pasando de 3.6MPa a 3.4 MPa.

De los resultados de ultrasonido realizado a los muretes se puede concluir que debido a la naturaleza de la mampostería estudiada no se puede establecer una apropiada correlación con los datos obtenidos, debido a que no se observó ninguna tendencia al momento de relacionar las resistencias con las velocidades de onda, ya que varios datos no presentaban coherencia dentro del conjunto y actualmente no se encuentran curvas donde se relacionen estos parámetros para este tipo de material, por tanto resulta necesario realizar más muestras con diferentes dosificaciones que puedan contribuir a un mejor ajuste para la curva. En investigaciones pasadas el análisis realizado a los ensayos de ultrasonido no era concluyente en relación con el ensayo destructivo, por la naturaleza anisotrópica y totalmente heterogénea del material, el ultrasonido solo toma la medida del tiempo que tarda la onda en atravesar el espécimen, sin considerar qué material falla primero.



## 7. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que las propiedades de la mampostería dependen fuertemente de cómo está constituida ésta, se recomienda continuar haciendo el mayor número de ensayos tanto físicos como químicos a los materiales que la constituyen, con el fin de seguir identificando los materiales más idóneos que se puedan emplear en procesos de restauración y con el fin de ampliar la base de datos frente a las propiedades de los mismos

Sabiendo que el mortero es el que determina la falla en este tipo de mampostería, se recomienda que los muretes se elaboren con cales de la mejor calidad y se estudien diferentes dosificaciones óptimas de cal arena, además de considerar adiciones de otros materiales que le confieran mejores propiedades al mortero sin perder de vista que se van a emplear en bienes patrimoniales.

De igual modo, se recomienda realizar ensayos de ultrasonido a los muretes elaborados con diferentes dosificaciones y proporciones para así obtener una curva con datos más completos que permitan realizar una correcta correlación entre el análisis de ultrasonido y el de resistencia a la compresión.

Para complementar la presente investigación se aconseja realizar ensayos a la compresión y tensión diagonal, para revisar parámetros como la resistencia a corte y el módulo de Corte, fundamentales para el estudio del comportamiento de los muretes ante un sistema de carga análogo al de la carga sísmica, a su vez de continuar realizando ensayos de resistencia a la compresión simple que permitan reafirmar los resultados que se han obtenido tanto en esta investigación como



en investigaciones pasadas, empleando el mayor número de muestras posibles y estandarizando un proceso en su construcción para reducir posibles errores humanos que repercuten en los resultados finales.

Es recomendable también realizar pruebas de adherencia entre el mortero de recubrimiento y la malla electro soldada con el fin de garantizar un mejor comportamiento entre estos dos materiales.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, A. (2018). “*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.*” Universidad de Cartagena.
- Aguirre Castellar, L. F., & Arrieta Torres, A. A. (2014a). *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.
- Aguirre Castellar, L. F., & Arrieta Torres, A. A. (2014b). *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). Retrieved from <https://www.bps.go.id/dynamictable/2018/05/18/1337/persentase-panjang-jalan-tol-yang-beroperasi-menurut-operatornya-2014.html>
- Bacca Sanchez, G., & Claro Lazaro, J. A. (2012). *Resistencia De La Mampostería Reforzada Exterioemente Usando Malla Electrosoldada Con Fines De Reforzamiento En Viviendas De La Ciudad De Ocaña.*
- Berrocal Olave, A. (2018a). *Evaluación patológica de la vulnerabilidad sísmica y efectos del oleaje en el fuerte-batería de San José y San Fernando de Bocachica.* Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/52443>
- Berrocal Olave, A. (2018b). *Evaluación patológica de la vulnerabilidad sísmica y efectos del oleaje en el fuerte-batería de San José y San Fernando de Bocachica.*
- Buelvas Moya, H. A. (2012a). *Estudio del comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP basado en el análisis de modelos históricos: Estado del arte.* (Universidad Industrial de Santander). Retrieved from <https://docplayer.es/42846497-Homer->



armando-buelvas-moya.html

Buelvas Moya, H. A. (2012b). *Estudio del comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP basado en el análisis de modelos históricos: Estado del arte*. Universidad Industrial de Santander.

Cabrera, A. (2017). IDENTIDAD , SIGNIFICADO CULTURAL Y PROSPECTIVA . Tesis Doctoral Alfonso Rafael Cabrera Cruz Director : Dr . Rafael López Guzmán. *Universidad Nueva Granada, 1*, 487.

Camargo Bocanegra, A. F., & Gamarra Torres, J. C. (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). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>

Carcaño, R. G. S., Iván, É., & Castillo, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería*, 8(2), 41–52.

COMISION ASESORA PERMANENTE PARA EL REGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.

Consuegra, I., Ricardo, B., Puello, Z., Villarreal, H., María, L., Jorge, V., ... Manzano, C. (n.d.). *Patrimonio Cultural desde diversas miradas*.

Fernandez Torres, G., & Palencia Cantillo, S. (2014a). *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 comparalo con el utilizado actualmente en su restauración, prov. Universidad de Cartagena*.



- Fernandez Torres, G., & Palencia Cantillo, S. (2014b). *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*, prov. 107.
- Flores, L. E., Rios, M., & Reyes Salinas, C. (2004). Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas. *Sociedad Mexican Mexicana de Ingeniería Estructu Estructural*, 1–10.
- Gamarra Atencia, J. R., & Martinez Dominguez, I. (2011). *Resistencia estructural de la mampostería de tipología colonial, cascoteo, en las estructuras de la ciudad de Cartagena de Indias*. Universidad de Cartagena.
- Gaspar-Tébar, D. (1980). Normalización del cemento. Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo. *Materiales de Construcción*, 30(178), 39–57.  
<https://doi.org/10.3989/mc.1980.v30.i178.1078>
- Guerrero, J. (2001a). Rocas calizas: Formación, ciclo carbonato, propiedades, aplicaciones. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 5(14), 3–14. Retrieved from <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo1t14R.pdf>
- Guerrero, J. (2001b). Rocas calizas: Formación, ciclo carbonato, propiedades, aplicaciones. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 5(14), 3–14.
- Huertes Fuertes, R., Rubio de Hita, P., & Rodriguez Liñan, C. (1993). *Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción*. 9–22.
- ICOMOS International Council on Monuments and Sites. (1984). *Recommendation of inscription on the World Heritage List - Port, Fortresses and Group of Monuments, Cartagena*. 2.
- Morales, A. F. E. (2018). *Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena , compatibles con morteros*



*patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida , en edificaciones históricas.*

Palacios Salinas, H. (2010). *Manual para el estudio microscópico de rocas sedimentarias.*

Rougier, V. C. (2007a). *Refuerzo de muros de mampostería con materiales compuestos.* Retrieved from <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/wp-content/uploads/sites/22/2016/05/Tesis-doctorado-V-Rougier.pdf>

Rougier, V. C. (2007b). *Refuerzo de muros de mampostería con materiales compuestos.*

Ruiz Garcia, J., & Alcocer Martinez, S. (1998). Malla electrosoldada en el desempeño de edificaciones en mampostería confinada.pdf. *Revista de Ingeniería Sísmica No 59, 20.*

Soto Osorio, A. (2015). *Estudio comparativo de la resistencia estructural en mampostería de tipología colonial en la ciudad de Cartagena de Indias.* (Universidad de Cartagena). <https://doi.org/10.22519/22157379.785>

Tejeda Jacome, J. de la C., & Silva Echartea, C. E. (2002). ESTUDIO DE RESISTENCIAS A COMPRESION DIAGONAL (CORTANTE), DE MURETES DE MAMPOSTERIA FABRICADOS CON MATERIALES DE LA ZONA CONURBADA COLIMAVILLA DE ALVAREZ. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C.*, (01), 349–356.

Yañez, N., & Mendoza, G. (2011). *Comportamiento de la mampostería sometida a esfuerzos cortantes, reforzada con mallas metálicas y recubrimientos de mortero.* Universidad Autónoma de Querétaro.



# ANEXOS



<b>Autor</b>	July Pauline Devoz Díaz	<b>Lugar</b>	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas		
<b>Descripción</b>	Ensayos a materiales constitutivos de concreto ciclópeo		
<b>ENSAYO DE HUMEDAD</b>			
<b>Datos</b>	<b>CALIZA</b>	<b>LADRILLO</b>	<b>POMEZ</b>
<b>Peso húmedo</b>	2118.8	1937.5	1745.9
<b>Peso seco</b>	2129.8	2007.4	1795
<b>Peso recipiente</b>	64.7	71.5	66.1

Anexo 1. Resultado ensayos de humedad de los materiales  
Fuente: Autores

El contenido de agua del material se calcula así:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Anexo 2. Ecuación contenida de agua

Donde:

w= contenido de agua (%)

$W_1$  =masa del recipiente y del espécimen húmedo (g)

$W_2$  =masa del recipiente y del espécimen seco (g)

$W_c$  =masa del recipiente (g)

$W_w$  =masa del agua (g)

$W_s$  =masa de las partículas sólidas (g)



<b>Autor</b>	July Pauline Devoz Díaz		<b>Lugar</b>	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas			
<b>Descripción</b>	Ensayos a materiales constitutivos de concreto ciclópeo			
<b>ENSAYO GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS INV-E-223-07</b>				
<b>Datos</b>	<b>CALIZA</b>	<b>LADRILLO</b>	<b>POMEZ</b>	
<b>Peso seco (gr)</b>	2285.6	2201.1	2229.6	
<b>Peso saturado superficialmente seco (gr)</b>	2403.3	2433.6	2551.2	
<b>Peso sumergido (gr)</b>	1412.5	1344	1170.2	
<b>Peso del recipiente (gr)</b>	187.2	170	187.9	
<b>Gsb</b>	2.31	2.02	1.61	
<b>Gsb<sub>sss</sub></b>	2.43	2.23	1.85	
<b>Gsa</b>	2.62	2.57	2.10	
<b>% Absorción</b>	5.15	10.56	14.42	

Anexo 3. Resultado ensayo de gravedad específica y absorción de los materiales.  
Fuente: Autores

### Cálculos realizados en la tabla anterior:

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \quad G_{sb_{sss}} = \frac{B}{B-C} \quad G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad \% \text{ Absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Anexo 4. Fórmulas gravedad específica

Donde:

A=masa en el aire de la muestra seca en gramos

B=masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca en gramos

C= masa sumergida en agua de la muestra saturada en gramos

$G_{sb}$  = gravedad específica

$G_{sb_{sss}}$  =gravedad específica saturada superficialmente seca

$G_{sa}$  =gravedad específica aparente.



<b>Autor</b>	July Pauline Devoz Díaz	<b>Lugar</b>	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas		
<b>Descripción</b>	Ensayos de desgaste para agregados gruesos		
<b>ENSAYO RESISTENCIA AL DESGASTE INVE-219-07</b>			
<b>Datos</b>	<b>CALIZA</b>	<b>POMEZ</b>	
<b>Gradación utilizada</b>	G	G	
<b>Número de esferas</b>	12	12	
<b>Número de revoluciones (rpm)</b>	1000	1000	
<b>Total, muestra (P1)</b>	10000	10000	
<b>Masa material seco retenido en el tamiz No 12 (P2)</b>	6010	4115	
<b>Desgaste (%)</b>	39.90	58.85	

Anexo 5. Resultado ensayo de Resistencia al desgaste para roca caliza y pómez  
Fuente: Autores

#### Ecuación resistencia al desgaste:

La diferencia entre la masa inicial de la muestra seca  $P_1$  y la masa del material seco retenido en el tamiz No 12 luego del ensayo  $P_2$  expresada como porcentaje de la masa inicial, será el desgaste de la muestra.

$$\%Desgaste = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100$$

Anexo 6. Ecuación Resistencia al desgaste

<b>Autor</b>	July Pauline Devoz Díaz		<b>Lugar</b>	Universidad de Cartagena
	Laura Cristina Terán Simancas			
<b>Descripción</b>	Ensayos material cementante			
<b>Ensayo</b>	<b>CONSISTENCIA NORMAL NTC-110</b>			
<b>Muestra</b>	1	2	3	
<b>Muestra de cal (gr)</b>	500	500	500	
<b>Cantidad de agua(ml)</b>	225	245	250	
<b>Precentaje de agua</b>	45	49	50	
<b>Penetracion vastago (mm)</b>	7	11	12.5	
<b>Consistencia</b>	<b>47.80%</b>			

Anexo 7. Resultado ensayo de consistencia normal de la argamasa  
Fuente: Autores

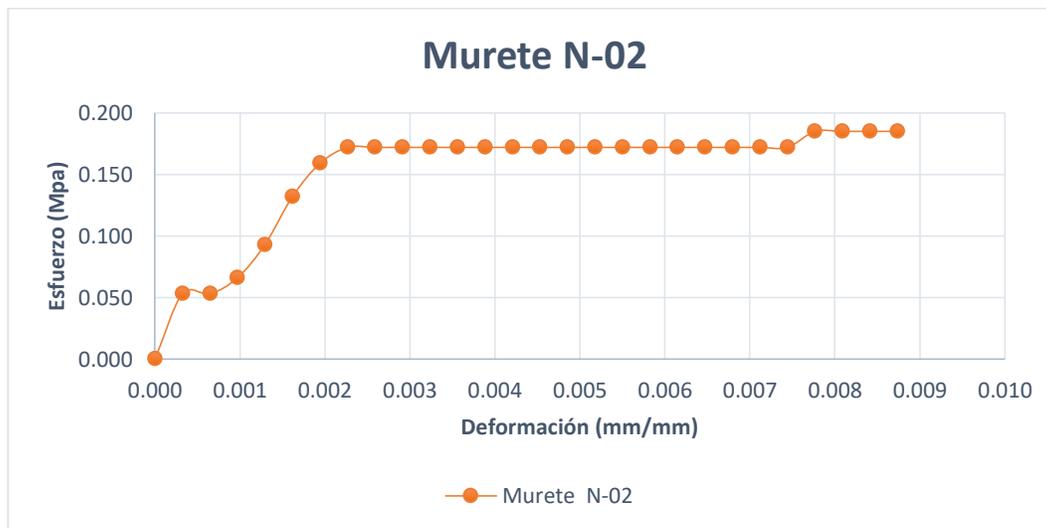
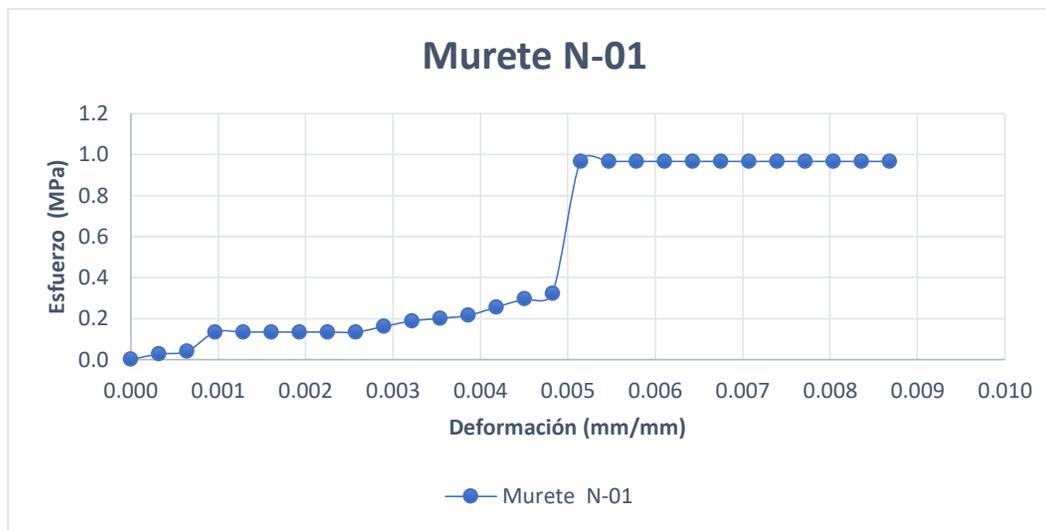


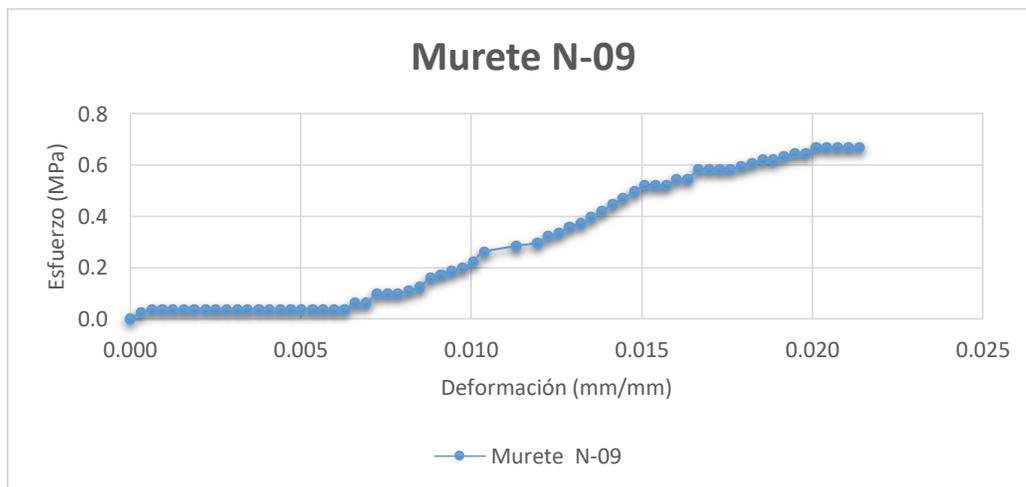
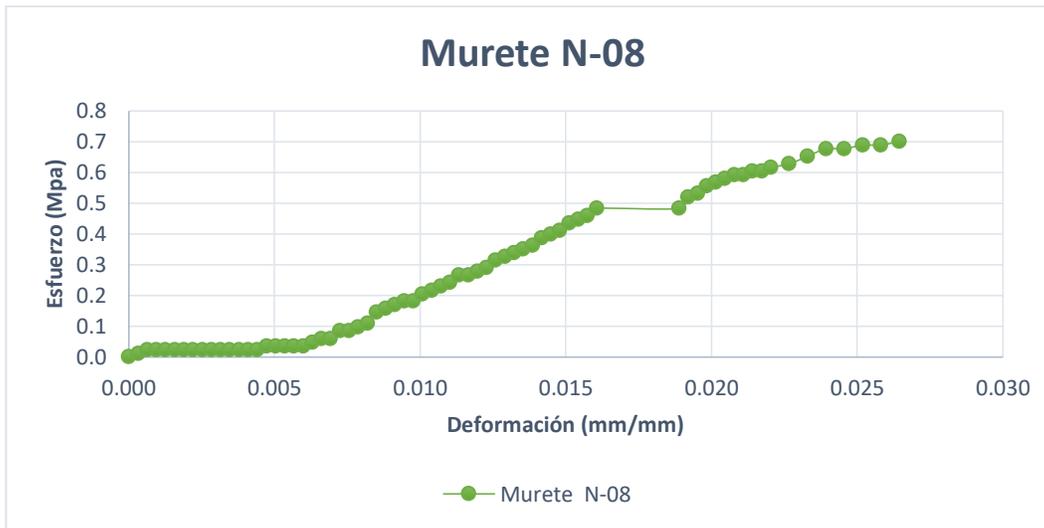
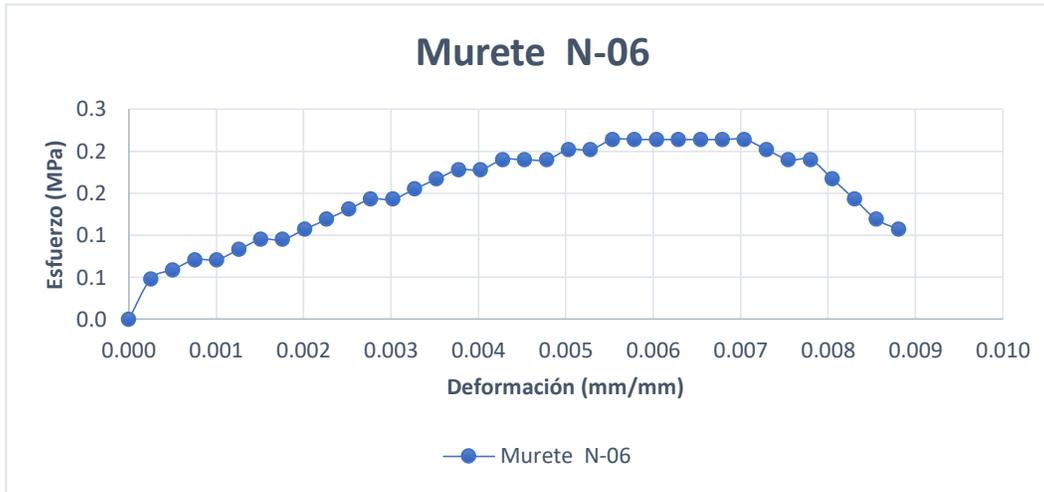
### Ecuación distribución T-STUDENT

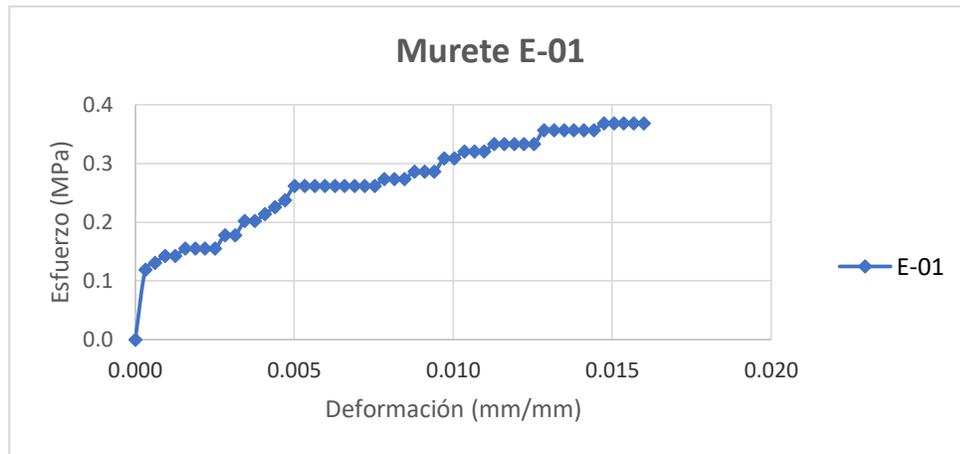
$$\bar{X} - t_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{\hat{S}}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{\hat{S}}{\sqrt{n}} \quad (27)$$

Anexo 8. Ecuación para determinar el intervalo de confianza

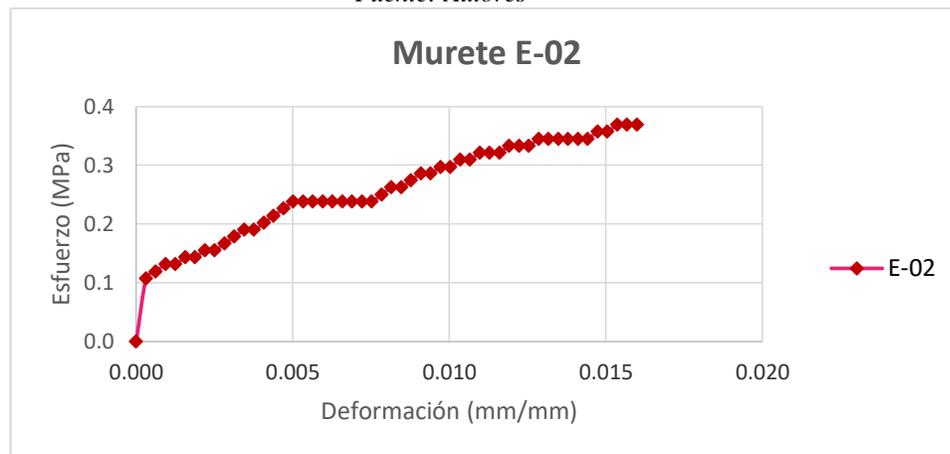
Anexo 9. Gráficas esfuerzo – deformación para los muretes que no entran en el promedio.



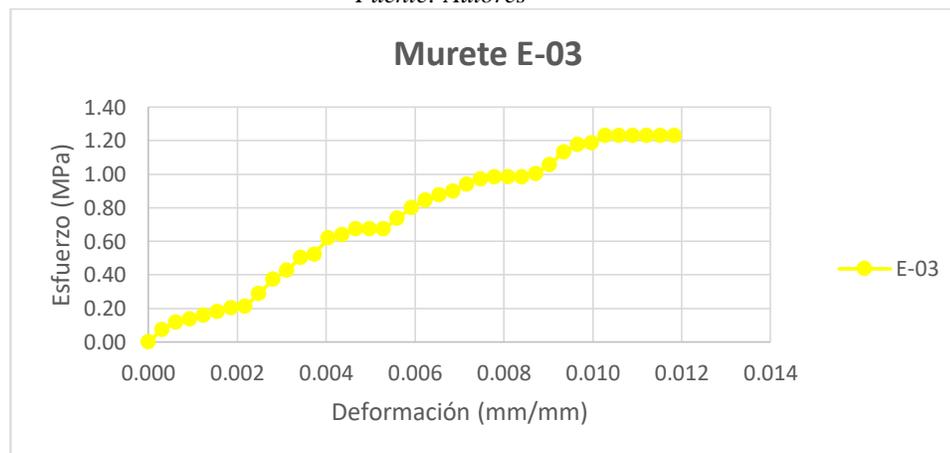




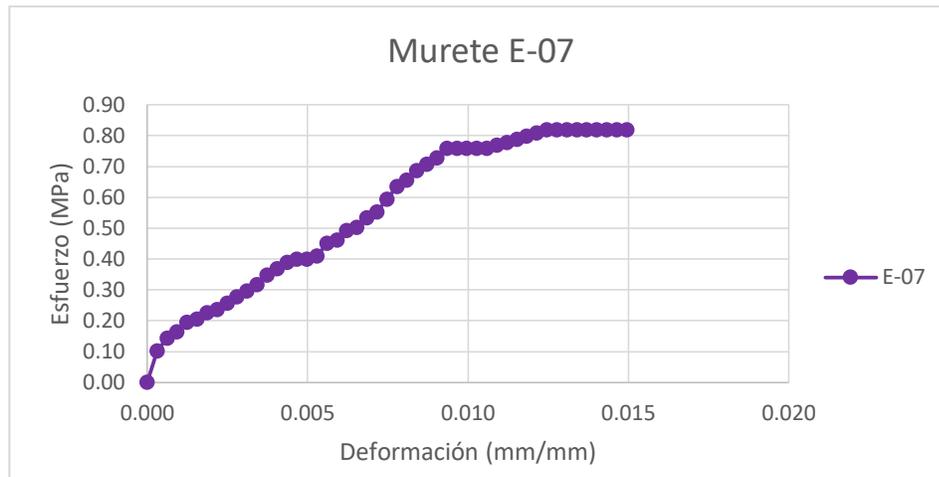
Gráfica 30. Esfuerzo/deformación Murete E-01  
Fuente: Autores



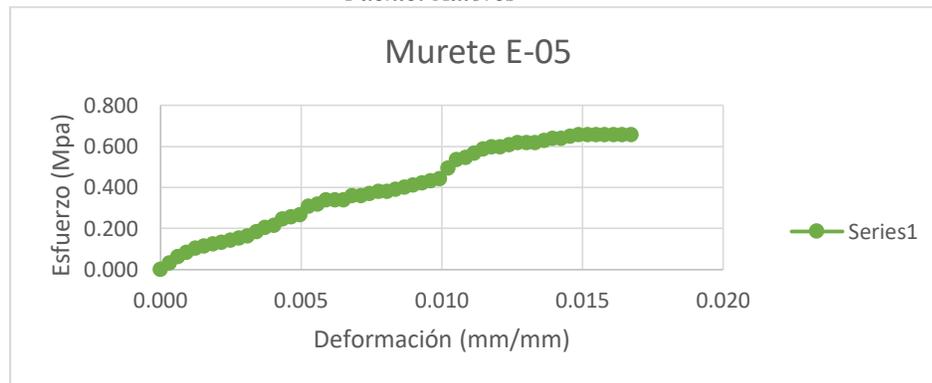
Gráfica 31. Esfuerzo/deformación Murete E-02  
Fuente: Autores



Gráfica 32. Esfuerzo/deformación Murete E-03  
Fuente: Autores



Gráfica 33. Esfuerzo/deformación Murete E-07  
Fuente: Autores



Gráfica 34. Esfuerzo/deformación Murete E-05  
Fuente: Autores