

**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**



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

ANDRÉS FELIPE CAMARGO BOCANEGRA

JOSE CARLOS GAMARRA TORRES

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
CARTAGENA DE INDIAS
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

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**

Investigadores:

**ANDRES FELIPE CAMARGO BOCANEGRA
JOSÉ CARLOS GAMARRA TORRES**

**Trabajo de grado para optar al título de:
INGENIERO CIVIL**

**Grupo de investigación:
ESCONPAT**

**Línea De Investigación:
CONSERVACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LOS MONUMENTOS**

**Investigador Director:
MSC. ARNOLDO BERROCAL OLAVE**



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
CARTAGENA DE INDIAS
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**



NOTA DE ACEPTACIÓN

Director
ARNOLDO BERROCAL OLAVE

Jurado
JOSÉ ESPAÑA MORATTO

Jurado
JORGE ALVAREZ CARRASCAL

Cartagena de Indias D. T y C., Marzo de 2016

DEDICATORIAS

A Dios, dador de sabiduría y motor principal de nuestro esfuerzo.

A nuestros padres, ejemplos de superación y perseverancia que nos permitieron sobrellevar todas las dificultades que se presentaron durante este proyecto.

A nuestros compañeros, amigos y personas incondicionales que demostraron su colaboración desinteresada en los momentos que necesitamos apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a Dios por permitir la oportunidad de culminar otra etapa de nuestra vida satisfactoriamente.

A nuestros padres y hermanos por hacer que este logro fuera posible con su apoyo incondicional sin importar dificultades o adversidades.

Al director del proyecto ingeniero Arnoldo Berrocal Olave, por ser guía y por su constante ayuda durante el desarrollo de la investigación que abarcó el presente trabajo de grado.

A docentes y colaboradores, en especial a los arquitectos Alfonso Cabrera Cruz y Alberto Herrera Díaz, y al ingeniero Modesto Barrios por sus valiosos aportes a la investigación.

Por ultimo a la universidad de Cartagena por hacer posible nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. GENERAL.....	16
1.2. ESPECÍFICOS.....	16
2. ALCANCE.....	18
3. ESTADO DEL ARTE.....	21
4. MARCO TEÓRICO	36
4.1. FORTIFICACIONES DE CARTAGENA DE INDIAS	36
4.1.1. Generalidades de las murallas	37
4.2. MATERIALES ANTIGUOS DE CONSTRUCCIÓN	40
4.2.1. Rocas calizas	40
4.2.2. La cal.....	41
4.2.3. Ladrillo militar.....	42
4.2.4. Piedra coral.....	42
4.2.5. Argamasa	43
4.3. ESFUERZO NORMAL Y DEFORMACIÓN UNITARIA	43
4.4. ENSAYO DE MATERIALES.....	45
4.4.1. Métodos de ultrasonido	46
4.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MAMPOSTERÍA (f'_m), SEGÚN LA NSR-10.....	48
4.5.1. Determinación experimental sobre muretes de prueba.....	48
4.5.2. Calculo del módulo de elasticidad según la NSR-10	49
4.6. REGRESIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS.....	50
4.6.1. Regresión lineal	50
4.6.2. Regresión polinomial	52
5. METODOLOGÍA	54
5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	54
5.2. EXTRACCIÓN DE MURETES ORIGINALES EN EDIFICACIÓN COLONIAL	55
5.3. ELABORACIÓN DE MURETES DE MORTERO COLONIAL MIXTO	58



5.4. DETERMINACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN.....	63
5.5. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
6.1. RECONOCIMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA.....	67
6.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN MURETES.....	68
6.2.1. Ensayo no destructivo.....	68
6.2.2. Ensayo destructivo	70
6.2.3. Esfuerzos contra deformaciones	74
6.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE ULTRASONIDO EN LA MURALLA	80
6.4. COMPARACIÓN DE MÉTODOS	81
6.5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MORTERO COLONIAL MIXTO.....	83
7. CONCLUSIONES.....	85
8. RECOMENDACIONES.....	87
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
10. ANEXOS	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1- Factor de corrección por esbeltez para f'_m	49
Tabla 2 - clasificación de muretes.....	64
Tabla 3 - resultados ultrasonido en muretes.....	68
Tabla 4 - resultados de compresión en muretes.	70
Tabla 5 - resultados de ultrasonido en contraescarpa de la muralla.....	80
Tabla 6 - Rango de resistencias empíricas en mampostería tipo I.....	81
Tabla 7 - Cuadro comparativo de resultados.....	82

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 – Escarpa	38
Ilustración 2 – Contraescarpa	38
Ilustración 3 – Plataforma.....	39
Ilustración 4 – Garita	39
Ilustración 5 - Barra sujeta a tensión	44
Ilustración 6 - Tipos de ensayos.	46
Ilustración 7 - Equipo de ultrasonido	47
Ilustración 8 - Trasmisión directa, semidirecta e indirecta.....	47
Ilustración 9 – Localización del tramo de muralla ensayada.....	55
Ilustración 10 - Mampostería colonial mixta en edificación del centro histórico	56
Ilustración 11 - Extracción del bloque de mampostería colonial mixta	56
Ilustración 12 - Bloques de mampostería colonial mixta extraídos.....	57
Ilustración 13 - Dimensiones requeridas.	57
Ilustración 14 - proceso de pañetado en muretes extraídos.....	58
Ilustración 15 - Tableta militar.	59
Ilustración 16 – Roca coral.....	60
Ilustración 17 - Roca Pómez.....	60
Ilustración 18 - Material fracturado de canteras actuales.....	61
Ilustración 19 - Formaletas de madera.	61
Ilustración 20 - Mortero colonial mixto.	62
Ilustración 21 - Murete colonial mixto en formaleta.....	62
Ilustración 22 - Material antiguo rescatado.	63
Ilustración 23 - Ultrasonido en muretes.	63
Ilustración 24 - Ensayo de muretes a compresión.	64
Ilustración 25 - Ensayo de ultrasonido en la contraescarpa de la muralla.....	65
Ilustración 26 - Identificación de los componentes del mortero colonial mixto.....	67



Ilustración 27 - Murete luego de prueba a compresión.	72
Ilustración 28 - Proceso de falla en murete.	73
Ilustración 29 - Patrón de falla en muretes.	73
Ilustración 30 – Ficha técnica del mortero colonial mixto.	84

LISTA DE GRAFICOS

Gráfica 1 – Resultados ultrasonido en muretes.....	69
Gráfica 2 – Resultados ensayo destructivo a compresión.....	71
Gráfica 3 – Resultados de deformación por carga axial grupo1.....	75
Gráfica 4 - Resultados de deformación por carga axial grupo 2.....	76
Gráfica 5 - Resultados de deformación por carga axial grupo 3.....	77
Gráfica 6 - Resultados de deformación a carga axial de todas las muestras.....	78
Gráfica 7 - Diagrama de esfuerzo vs deformación ..	79
Gráfica 8 – Resultados de ultrasonido en la contraescarpa de la muralla.....	80
Gráfica 9 – Gráfico comparativo de resultados.	82

RESUMEN

La construcción de las fortificaciones que defendieron a Cartagena de Indias durante largos periodos de su historia, tuvo su gran éxito en el carácter estricto y ordenado en que se basó la selección de materiales, actividad en la cual siempre primó la calidad de los materiales por encima de la dificultad de su obtención, razón por la cual esta investigación comparó las resistencias a la compresión que presentan hoy en día la mampostería colonial mixta o de tipo cascoteo que se conserva en algunos tramos de la contraescarpa de la muralla y edificaciones del centro histórico de la ciudad, con las generadas por muretes de mampostería contruidos a manera de réplica con materiales que se destinan en la actualidad para llevar a cabo obras de conservación del patrimonio.

El proyecto desarrolló una investigación de tipo mixto donde la exploración de información bibliográfica fueron los pilares de la etapa de experimentación mediante pruebas in situ y de laboratorio. Se ensayaron a la compresión tres grupos de muretes; los elaborados con materiales disponibles en la actualidad, los realizados con materiales antiguos reciclados de mampostería original y los extraídos de una edificación colonial dentro del centro histórico de Cartagena. Se encontró que la resistencia generada por las muestras de materiales actuales ($4,46 \text{ Kg}/\text{cm}^2$) resultó menor que las obtenidas de las hechas con materiales antiguos ($10,98 \text{ Kg}/\text{cm}^2$) y la correspondiente a muestras extraídas ($6,26 \text{ Kg}/\text{cm}^2$).

Se emplearon ensayos no destructivos de ultrasonido en muretes y contraescarpa de la muralla obteniendo resultados hasta 10 veces mayores a los presentados en pruebas destructivas, demostrando así la impertinencia de los métodos de ultrasónicos en este tipo de mampostería colonial.

PALABRAS CLAVES:

Argamasa – Contraescarpa – Ensayos destructivos – Fortificaciones – Ultrasonido.

ABSTRACT

The construction of the fortifications that defended Cartagena de Indias for long periods of its history, had its great success in the strict and orderly character in the selection of materials, an activity which always prevailed quality of materials was based above the difficulty of obtaining them, which is why this research compared the compressive strengths today presented mixed masonry colonial preserved in some sections of the counterscarp of the ramparts and buildings of the historic center of the city, generated by “low walls” of masonry constructed replica way with materials that are used today to carry out works of heritage conservation.

The project develops an investigation of mixed type, where exploration of bibliographic information were the pillars of the stage of experimentation by in situ and laboratory tests. Three groups of “low walls” were tested to compression; those made with materials available today, those made with recycled materials old original masonry and extracted from a colonial building in the historic center of Cartagena. It was found that the resistance generated by current materials samples ($4.46 \text{ Kg} / \text{cm}^2$) was lower than those obtained with the former materials made ($10.98 \text{ kg} / \text{cm}^2$) and corresponding to samples taken ($6.26 \text{ Kg} / \text{cm}^2$).

Ultrasonic nondestructive testing were used on “low walls” and ramparts counterscarp of the results obtained up to ten times higher than those presented in destructive tests, demonstrating the irrelevance of ultrasonic methods in this type of colonial masonry.

KEYWORDS:

Mortar - Counterscarp - Destructive testing - Fortifications - Ultrasound.

INTRODUCCIÓN

Ubicada al norte de Colombia, la ciudad de Cartagena de Indias guarda en su amurallado centro histórico un legado de edificaciones y fortificaciones concebidas con base a la mejor ingeniería militar europea de la época, siendo estas obras los únicos testigos vivientes de proceso completo de conquista y colonización Española que duró un poco más de tres siglos. Es por eso que permanece inscrito en la lista de patrimonio mundial de la UNESCO, como reconocimiento a su gran importancia histórica, cultural y turística.

Como factura de las secuelas del tiempo, en la actualidad se hace evidente el deterioro creciente por el cual atraviesan algunos monumentos como las murallas y edificaciones de la ciudad de Cartagena, razón por la cual el ejercicio de conservación en estos no debe descansar. Ante estas actividades de rehabilitación no se tiene la certeza de que estos se estén aplicando de manera correcta, por lo tanto no se garantiza la continuidad de las propiedades mecánicas de alta calidad con que fueron diseñadas y elaboradas estas estructuras antiguas, alterando la funcionalidad armónica y distribución de esfuerzos a los que están sometidos hoy en día.

En la actualidad los “daños por efecto de cascoteo” en la contraescarpa de las murallas, tienen su origen en el proceso de intervención, donde se rellenan con argamasa y retales de material mixto (sin tener en cuenta ningún tipo de proporciones) los espacios creados por las caries o pérdida total de la estructura pétreo, creando una falsa apariencia de textura llamada cascoteo, que no soporta ningún trabajo mecánico a los que están siendo sometidas estas estructuras antiguas (Rocha, 2003).

A un nivel muy general, el cordón amurallado de la Ciudad de Cartagena de Indias y las edificaciones que alberga, son objeto de una gran número de investigaciones patológicas, sísmicas, geotécnicas y constructivas; que han determinado recomendaciones para su uso adecuado, situación estructural, vulnerabilidad ante cargas o eventos sísmico, propiedades físicas y mecánicas de algunos de sus componentes y canteras de materiales con las características más adecuadas para restauración. Sin embargo, el caso de las fortificaciones

la mayoría de estos estudios centra sus intereses en los bloques sillares de piedra coralina que conforman la escarpa de la muralla, dándole un falso papel secundario a la contraescarpa y menospreciando su función estructural.

Se han llevado a cabo estudios que determinan propiedades físicas y mecánicas de materiales usados en muros de tipología colonial, realizando ensayos por separado a estos componentes sin tener en cuenta que dichos muros trabajan de manera colectiva y que es de gran importancia analizar su comportamiento en conjunto.

El presente proyecto dirigió su enfoque a los muros de tipología colonial I o tipo cascoteo,¹ los cuales se definen como una mezcla ciclópea compuesta de argamasa de arena y cal, más pedazos de piedra burda (roca coral y/o pómez) y fragmentos de teja o ladrillo. El objetivo de esta investigación fue determinar la resistencia a la compresión de este tipo de muros para usarla como parámetro de comparación frente a la obtenida de muretes fabricados bajo criterios antiguos de construcción, y así poder determinar si actualmente se puede lograr un mortero colonial mixto similar al original y obtener una serie de recomendaciones para la elaboración de este material especial en obras de conservación del patrimonio. Logrando este propósito por medio de pruebas destructivas y no destructivas a muestras extraídas, fabricadas y puntos seleccionados en las murallas del centro histórico de Cartagena de Indias.

Este trabajo es un instrumento dirigido a la protección y sostenibilidad que competen a la línea de investigación de conservación y consolidación de monumentos, aspectos inscritos dentro de los intereses del grupo de investigación Estructuras, Construcción y Patrimonio (ESCONPAT) de la Universidad de Cartagena, que junto con sus conclusiones y recomendaciones verifican la poca información existente, pero también amplían la bases de datos técnicos que pueden servir de apoyo para modelaciones por medio de software o cualquier otro tipo de investigación destinada edificaciones o fortificaciones antiguas con este tipo de mampostería antigua.

¹ Según la clasificación presentada en el estudio de Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias, por José España Moratto, Esteban Puello Mendoza y Edilber Almanza Vásquez.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

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.

1.2. ESPECÍFICOS

- Identificar los materiales que constituyen la mampostería colonial mixta existentes en edificaciones y fortificaciones del centro histórico de Cartagena.
- Determinar la resistencia a la compresión de la mampostería colonial mixta presente en edificaciones virreinales, mediante ensayos destructivos aplicados a muestras extraídas.
- Determinar la resistencia a la compresión de la mampostería colonial mixta presente en la contraescarpa de las murallas de Cartagena, realizando ensayos in situ no destructivos de ultrasonido.
- Determinar la resistencia a la compresión en muretes de mampostería colonial mixta elaborados a manera de réplica siguiendo los patrones de construcción observados en los muros originales, mediante ensayos destructivos y no destructivos.

- Evaluar si los materiales utilizados actualmente en las intervenciones realizadas al patrimonio generan una resistencia a la compresión similar respecto a las empleadas en el periodo colonial.
- Determinar la veracidad de los métodos ultrasónicos aplicados en el material no isotrópico presentes en las construcciones coloniales estudiadas del centro histórico de Cartagena, comparando las resistencias a la compresión obtenidas de los ensayos in situ de ultrasonido y los ensayos destructivos de laboratorio.

2. ALCANCE

El siguiente proyecto de investigación tuvo como objetivo final comparar la resistencia a la compresión entre muretes fabricados bajo técnicas antiguas de construcción y la mampostería colonial mixta presente en algunas zonas de la contraescarpa de las murallas de Cartagena de Indias y en casas virreinales dentro de su centro histórico.

La extensión de las murallas de Cartagena de Indias es de aproximadamente unos 4,3 km; y dentro de toda esta presenta un perfil típico en el cual se pueden determinar elementos como la escarpa, plataforma o terraplén y contraescarpa; esta última objeto de nuestro estudio presenta variaciones en sus técnicas constructivas las cuales generan como resultados unas tipologías de muros de contención diferentes, que a su vez fueron utilizadas en la construcción de la mampostería de las casas coloniales.

En la actividad de la conservación del patrimonio se hace necesario saber si las restauraciones que se están llevando a cabo para este tipo de muros presentan condiciones similares a las originalmente construidas en la antigüedad, por eso la razón de nuestro objetivo. El cual para poder llevarse a cabo, fue necesario la realización de pruebas destructivas y no destructivas a los elementos de estudio.

En primera instancia al encontrarse imposibilitada la extracción de muestras en la contraescarpa de la muralla debido a la importancia como monumento patrimonial se limitó la investigación a la realización de pruebas no destructivas ultrasónicas a lugares estratégicos escogidos por el director de investigación para después ser comparados con los resultados de resistencia a la compresión y ultrasonidos de tres muretes extraídos de una casa colonial ubicada en el Callejón de Los Estribos N° 20-240. Para garantizar la correcta extracción de los muretes en la edificación, se aplicarán distancias adicionales considerables como márgenes de seguridad al modelo expuesto en la metodología, asegurando así la integridad de las muestras a extraer para cumplir con las especificaciones del Título D de la NSR-10.

La imposibilidad de usar materiales del mismo origen que los usados en las murallas y edificaciones virreinales limitaron a la investigación a recurrir a canteras de materiales

actuales, pero a su vez surgió la oportunidad de evaluar la resistencia generada con los materiales que hoy en día se utilizan para las intervenciones en este tipo de obras y así poder hallar las diferencias por efecto de la calidad de los mismos en distintas épocas, utilizados para la construcción de la mampostería colonial mixta bajo los mismos criterios de fabricación.

Dentro de los resultados de la comparación se esperaba que la resistencia de los muretes fabricados fuera muy parecida o mayor que la ponderada arrojada por las pruebas realizadas a la muestra extraída de la casa colonial y los puntos estratégicos que conservan la tipología exacta del muro en la contraescarpa.

Se consideró como una posibilidad que los valores arrojados por las pruebas de ultrasonido se dispersaran unos con otros en los diferentes puntos de muestra y por ende, su promedio con respecto a los concluidos por los ensayos de compresión.

Como producto final se espera obtuvo un conjunto de consideraciones, parámetros o pasos que se deban tener en cuenta a la hora de realizar morteros coloniales de tipo mixto para intervenciones de remodelación o restauración que se practiquen sobre muros de la tipología estudiada en la contraescarpa del cordón amurallado del centro histórico de Cartagena de Indias y las casas coloniales que este alberga.

Los resultados obtenidos podrán servir como referencias para otras investigaciones y/o modelaciones mediante cualquier software estructural. Así como sirvieron para evaluar la efectividad de las pruebas de ultrasonido como método obligatorio en los pliegos de condiciones para las intervenciones a las fortificaciones de la ciudad, todo con el fin de aportar a la conservación del patrimonio.

Este proyecto incentiva a seguir con la investigación de otras propiedades, físicas, químicas o mecánicas que ayuden a formar una amplia bibliografía y así poder abordar todos los tipos de mampostería colonial presentes en todas las edificaciones patrimoniales. Dentro de las limitaciones del mismo, se encuentra la imposibilidad de la generalización de la resistencia

para la obtención de cualquier tipo de mampostería colonial, debido a que por lo menos existen cuatro diferentes.

Por otro lado, la proporción de los materiales a usar para la fabricación de los muretes varía a lo largo de todo este tipo de muros presentes en la contraescarpa. Por lo tanto se utilizó una relación idealizada teóricamente en el estudio realizado por FONADE y el Ministerio de Cultura (Herrera Díaz, 2009).

El periodo de estudio que abarcó el proyecto de investigación fueron los dos semestres académico del año 2015, en el cual se llevó a cabo una revisión y clasificación de información secundaria a través de las bases de datos científicas y aquellas disponibles en la Universidad de Cartagena, y se determinaron los métodos, procesos y sistemas para la ejecución de los objetivos propuestos.

3. ESTADO DEL ARTE

La importancia de conservar en excelentes condiciones cualquier tipo legado cultural incentiva cada día a seguir investigando campos vacíos de información, es por eso que existen muchos estudios aplicados a obras patrimoniales y a los materiales que los conforman, con el fin de obtener resultados que puedan establecer los mejores criterios y fundamentos para la intervención de dichos monumentos.

Por su carácter patrimonial, las normas que protegen los bienes culturales, limitan a muchas investigaciones sobre mampostería colonial a la hora ensayar muestras extraídas de edificaciones de uso residencial que fueron construidas bajo requerimientos diferentes a los que exigían obras de ingeniería militar que están presentes en las murallas y baluartes de Cartagena de Indias, haciendo que los resultados no sean válidos para aplicarlos a modelaciones y otros estudios en fortificaciones.

A nivel local los distintos tipos de mampostería colonial y sus técnicas de construcción en las murallas (más específicamente en la contraescarpa), acumulan un campo de variables desconocidas que argumentan la necesidad de seguir investigando sus propiedades y características, con el fin de aportar fundamentos técnicos y precisos a las obras de rehabilitación y mantenimiento en monumentos patrimoniales. En el ámbito nacional e internacional encontramos que se han elaborados “muretes” con el fin de conocer los materiales usados en obras antiguas, pero no se encontraron registros de investigaciones de este tipo aplicadas a estructuras de ingeniería militar, como las estudiadas en este proyecto.

- **Estudio de patologías y capacidad de cargas del Cordón amurallado de Cartagena de Indias** (Rocha, 2003).

El ingeniero Jorge Rocha, contratado por la sociedad de mejoras públicas de Cartagena, realizó un diagnóstico patológico en baluartes y cortinas, el cual describe los deterioros y sus causas, e identifica la capacidad de carga de cada elemento de las murallas. Una de las conclusiones de este estudio afirma que las técnicas con las que se interviene actualmente

(cascoteo) la contraescarpa de las murallas, son aplicadas para crear una fachada falsa que no cumple los requerimientos estructurales debidos.

Entre los daños o lesiones más comunes de los componentes de las murallas del Centro histórico de Cartagena que afectan de alguna forma al tipo de mampostería estudiada se encuentran los siguientes:

Caries Superficiales: La piedra caliza que conforma la estructura pétreo de soporte del lienzo de murallas y baluartes, presenta en muchas zonas un deterioro progresivo en su superficie con pérdida de material pétreo originado por: Corrosión de piedras calcáreas en placa, Agresión mecánica o de impacto, Agresión industrial, Agua lluvia y el viento.

Caries Profundas: Existen zonas donde los agentes antes mencionados han originado una desintegración de gran magnitud en la estructura pétreo, los cuales han producido lesiones colaterales.

Pérdida de Piedras Calizas: Con el tiempo, han desapareciendo piezas constitutivas de la estructura de los lienzos de murallas y baluartes, debido a la desintegración natural, los agentes climáticos y el vandalismo.

Fracturas en Estructura Pétreo: Originadas por la alteración del equilibrio estático que el monumento tenía anteriormente, el cual fue roto en el momento que el dinamismo de zonas adyacentes al lienzo de murallas, cambió, debido al tráfico sobre pavimento rígido, dado que el material de soporte de estas estructuras fue consolidándose diferencialmente originando sobreesfuerzos de cortante sobre el lienzo de muralla creando fracturas escalonadas.

Pérdida de Juntas: Gran parte del lienzo de murallas se encuentran en proceso de desestabilización por la pérdida de la pega o junta de argamasa debido a la meteorización y la escorrentía causada por la sobresaturación del material de plataforma.

Deterioro y Pérdida de Pañetes que Recubren la Estructura Pétreo: En general, se deterioran parcial o totalmente debido a: Agresión mecánica o de impactos, Lluvia ácida, Corrosión de argamasa, causada por el crecimiento de microorganismos situados en la vecindad de la superficie, Existen zonas del cordón amurallado donde el acabado externo de

la estructura ha sido afectada por el fenómeno de ascensión por capilaridad del agua, con alto grado de descomposición, debido al estancamiento permanente de las aguas.

Daños por Efectos de Cascoteo: Su origen radica en el manejo inadecuado de los sistemas constructivos empleados en el proceso de intervención, donde se rellena con argamasa y retales de material mixto los espacios creados por las caries o pérdida total de estructura pétreo, creando una falsa apariencia de textura o en su defecto este cascoteo, no soporta ningún trabajo mecánico a que están siendo sometidas estas estructuras antiguas.

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

Este trabajo tuvo la finalidad de determinar los parámetros básicos para normalizar la mampostería de tipología colonial, usada en las construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena. En él se estudiaron las propiedades estructurales de cuatro tipos de muros que se encuentran en las edificaciones residenciales coloniales, analizándolos para así obtener parámetros estructurales que permitieron evaluar sus capacidades de carga. Esto debido a que en Colombia no existen normas aplicables a este tipo de estructuras coloniales, construidas con materiales como piedra caliza, ladrillos tipo tableta militar y argamasa que actúa como material aglomerante.

Se usó una metodología de tipo investigativa, utilizando la información obtenida de estudios y ensayos realizados a la argamasa, efectuados anteriormente por profesionales de la universidad de Cartagena, con base en esto y utilizando diferentes proporciones en las combinaciones cal-arena se calcularon las resistencias de los diferentes tipos de muros y la carga que estos teóricamente reciben. Por medio de esta investigación se pudo establecer una expresión matemática para calcular la carga axial que resisten los diferentes tipos de muros que conforman las estructuras coloniales de la ciudad de Cartagena.

Este estudio, solo determinó una ecuación para efectuar el cálculo de la resistencia de los muros en casas coloniales ubicadas en el centro histórico de Cartagena pero no se examinaron

las resistencias de las murallas, ni la posibilidad de utilización de materiales similares contemporáneos.

- **Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias** (España Moratto , Puello Mendoza, & Almanza Vázquez, 2009).

En este trabajo se determina empíricamente la resistencia de distintas mezclas de piedra coralina, piedra de coral, ladrillos tipo tableta militar y argamasa (mezcla de arena y cal), que actúa como material aglomerante, para normalizar la mampostería de tipología colonial, usada en las construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena de Indias. Se determinaron las propiedades estructurales de los cuatro tipos de muros que se encuentran en las edificaciones residenciales coloniales, obteniendo parámetros estructurales que servirán para evaluar sus capacidades de carga y el factor de corrección α que afecta la resistencia teórica calculada de los muros, respecto a la resistencia experimental. Se establece teóricamente la mejor composición de las proporciones de los materiales de las mezclas, desde el punto de vista de la resistencia de las estructuras coloniales.

Los resultados que se obtienen en este estudio son netamente teóricos ya que no se realizan ningún tipo de ensayos. Se basan en la teoría de que la resistencia total del hormigón se define como la suma de las resistencias parciales de cada uno de sus componentes, proporcional al porcentaje de participación en la mezcla.

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

Esta investigación tuvo la finalidad de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los principales materiales disponibles para restaurar el cordón amurallado en la ciudad de Cartagena, tomando como referencia las principales fuentes que los suministran en el departamento de Bolívar. Para cumplir este objetivo, se recolectó toda la información

existente sobre el tema, se contactó con arquitectos que han intervenido estas fortificaciones, se visitaron entidades encargadas de conservar los monumentos de la ciudad y se realizaron ensayos a los materiales hallados (caliza, ladrillo y argamasa) en las distintas fuentes (Turbaco y Bayunca). Las propiedades físicas y mecánicas que se establecieron como fundamentales en dichos materiales fueron: la resistencia a la compresión, desgaste, densidad y porosidad.

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

Los autores recomiendan analizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados originalmente en la construcción de las murallas, para luego compararlos con los materiales que están disponibles para su restauración.

- **Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas de Cartagena y el utilizado para su restauración y rehabilitación** (Rhenals Acuña & Santos De Ávila, 2012).

El objetivo de este trabajo fue comparar las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas de Cartagena y el utilizado para su restauración y rehabilitación, mediante ensayos destructivos y no destructivos para así establecer qué cantera cuenta con el material rocoso óptimo requerido en este tipo de obras, con el fin de garantizar la conservación de las características del monumento. Para su

cumplimiento, se desarrolló una investigación de tipo mixto en la cual se realizó una revisión bibliográfica del tema, ensayos de laboratorio al material rocoso de las canteras Coloncito y La Constancia para conocer propiedades importantes como la Densidad, Desgaste, Resistencia a la Compresión y Porosidad y, de igual manera, se efectuaron ensayos no destructivos con Pulso ultrasónico y Esclerómetro sobre Las Murallas con el fin de obtener las propiedades del material antiguo.

Como resultado de esto, el material de la cantera Coloncito presentó las mejores propiedades físicas y mecánicas, y muestra ser de buena calidad. Además, se encontró que las propiedades varían a lo largo del tramo de muralla analizado por lo cual el estudio de esta se dividió en tres zonas diferentes.

Los autores recomiendan efectuar estudios en una zona específica de las murallas que presenta bajas resistencias a la compresión y, posiblemente puedan ser a consecuencia del deterioro del material o sencillamente a las características de la roca que se utilizó en su construcción. Además, debido a la metodología utilizada para cuantificar esta propiedad (método del esclerómetro) no fue posible obtener un valor exacto de esta, solo se puede afirmar que la resistencia a la compresión en esta zona es menor a 110 kg/cm^2 , esto a causa de que la tabla de correlaciones entre los rebotes del esclerómetro en el material ensayado, el ángulo de ensayo y la resistencia a la compresión solo muestra valores a partir de los 20 rebotes y, en esta zona, los rebotes resultaron menores a 20.

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

En esta investigación se determinan directamente las características mecánicas de uno de los tipos de mampostería colonial (tableta militar y argamasa) de edificaciones de uso residencial en la ciudad de Cartagena de Indias, donde se calculan la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, módulo de corte, relación de Poisson, peso por unidad de volumen, masa por unidad de volumen, resistencia a la compresión de ladrillos de arcilla cocida y de la argamasa.

Se demuestra que las ecuaciones propuestas por el Código Colombiano Sismo resistente (NSR-10) no semejan las propiedades mecánicas de la mampostería colonial compuesta por tabletas de arcilla y con mezclas de aglutinantes de argamasa. En consecuencia, plantean nuevas ecuaciones para el cálculo del módulo de corte en relación con la resistencia a la compresión de la mampostería colonial, las cuales dan nuevos lineamientos que permiten realizar una caracterización de la mampostería diferente.

Debido a que las muestras fueron recuperadas en la demolición de un muro dentro de una edificación colonial, y no fabricadas, la geometría que se le dio a las muestras no comparte los criterios de dimensionamiento descritos en título D de la NSR-10.

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

A través de este trabajo se busca 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, en este caso se estudiaron el ladrillo, madera y el mortero.

El proyecto fue planteado como una investigación de tipo mixto, en esta se comprende un ámbito descriptivo y otro experimental. El proyecto se desarrolló básicamente en cinco fases fundamentales: la recopilación y análisis de información existente, en la segunda fase se llevó a cabo la identificación de los lugares de estudio (Obra Pía) y los lugares donde son adquiridos los materiales utilizados actualmente (Ferretería Antioquia, Ladrillera Bayunca, Maderas Carrillo, Yadira Paternina). La tercera fase fue la realización de los ensayos destructivos y no destructivos, que comprende ensayos como resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia al corte, peso específico y desgaste etc. Realizadas las primeras tres fases se procedió a la cuarta y quinta fase que consistió en el análisis de los datos y la presentación del informe final.

Al comparar los resultados obtenidos se concluyó 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/cm², 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/cm².

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, por lo que deja en evidencia que la madera de Obra Pía no conservaba sus propiedades físicas y mecánicas, debido a su gran antigüedad y estar expuesta a la intemperie.

En la realización de las muestras de mortero se utilizó la Cal Nare y la Cal distribuida por la Ferretería Antioquia, los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días reflejan que la Cal Nare presenta una resistencia de 73,5 Kg/cm² y la Cal de la Ferretería Antioquia difiera de ésta con un 22% con un valor de 57,1 Kg/cm², por lo que se concluye que la cal Nare es la más apropiada para su uso en procesos de restauración.

Los autores recomiendan, que con el fin de ampliar y mejorar los datos y la información obtenida, estudiar la resistencia que pueden presentar el ladrillo y mortero en conjunto, a manera de muretes en las casas coloniales, la cual es una de las motivaciones principales de la presente investigación.

- **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 (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 2014).**

El objetivo de este trabajo fue demostrar que el material utilizado para la construcción de las murallas provino de Tierra Bomba. Adicionalmente se compararon las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas y el utilizado para

su restauración, y comprobar si dicho material es óptimo para restaurar este tipo de obras. Para su cumplimiento, se desarrolló una investigación de tipo mixto en la cual se realizó una revisión bibliográfica del tema, ensayos de laboratorio al material rocoso de canteras de la isla de Tierra Bomba para conocer propiedades importantes como la Densidad, Desgaste, Resistencia a la Compresión y Porosidad, también se utilizó información secundaria para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material constitutivo de las murallas y el utilizado para su restauración.

Como resultado de esto, se encontró 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/cm² 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%. Estos 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.

En este estudio no realizan pruebas para obtener sus propios resultados de las propiedades de los materiales originales de la muralla.

- **Bloque de tierra comprimida como material constructivo** (Arteaga Medina, Medina, & Gutiérrez Junco, 2011).

El Grupo de Investigación en Construcción Antisísmica -GICA-, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, presenta en este artículo, la tierra como material constructivo, las técnicas o sistemas constructivos, los bloques de tierra comprimida (BTC) y algunos ensayos realizados a estos bloques. El objetivo de este artículo es dar a conocer algunos de los materiales de construcción fabricados con tierra y usados en construcciones ancestrales, como el bloque de tierra comprimido; al igual que algunos de los ensayos realizados para obtener un producto de mayor rango de uso, coherente con los materiales

constructivos originales de edificios patrimoniales y para vivienda nueva, realizando un estudio a los bloques de tierra comprimida usados en el Claustro Santa Clara la Real (Tunja), cuya importancia patrimonial radica en distintos elementos arquitectónicos en conjunto con la capilla adyacente.

Los ensayos que se realizaron a los BTC son capilaridad, resistencia a la compresión, variaciones de dimensiones entre estados convencionales extremos, resistencia a la compresión húmeda y resistencia a la abrasión de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 5324. Se elaboraron dos muretes de bloque de tierra comprimida, cuyas dimensiones fueron 30 cm x 14 cm X 45 cm, los cuales fueron fallados a compresión simple en la máquina universal, cuya densidad fue de 2021,8925 kg/m³ (valor promedio) y resistencia a la compresión de 1,17 MPa (valor promedio). También se elaboraron 3 muretes de bloque de tierra comprimida con refuerzo de 46 cm x 14 cm x 45 cm, y se les aplicaron cargas a compresión diagonal, obteniendo valores del esfuerzo cortante y la deformación diagonal. La resistencia al corte es de 0,1926 MPa, con densidad igual a 1327,936 kg/ml.

En el ensayo a compresión simple de los bloques de tierra comprimida se obtiene que a mayor densidad, mayor es la resistencia. Comparando la resistencia de los bloques según su geometría, los que tienen una curva presentan mayor resistencia, seguidos de los macizos y perforados; aunque tal comparación se debería realizar con la misma cantidad de muestras. Se observa que existe una relación proporcional entre densidad, compactación y resistencia.

En el ensayo de compresión axial en los muretes, la falla depende de la interacción de los bloques con el mortero; entre más perforaciones tenga el bloque, menor será su resistencia. La primera falla se da en los bloques, luego se generan fallas en el mortero; esto debido a la diferencia entre la resistencia de los bloques y la resistencia de adherencia del mortero y el bloque.

En el ensayo de compresión diagonal de muretes de bloques de tierra comprimida se dio una falla en los bloques, lo que indica que la resistencia a la tensión de los bloques es menor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con el bloque, y se observa que los bloques y el mortero no conserva su adherencia falla en la junta; su falla es diagonal.

El estudio analiza algunas propiedades de materiales de construcción antiguos siguiendo el proceso desde su fabricación, teniendo en cuenta el comportamiento colectivo que genera un elemento compuesto por más de un material. Sin embargo, no comparan los resultados con las características físicas de los utilizados originalmente en la edificación estudiada, ignorando así, que la procedencia y procesos de los materiales antiguos pueden llegar a ser muy distintos a los actuales.

- **Evaluación del comportamiento de muros de mampostería no reforzada recubierta con morteros reforzados** (López, Quiroga, & Torres, 2012).

Este artículo presenta parte de los resultados de un programa experimental en el cual se puso a prueba este nuevo sistema estructural. Se ensayaron especímenes de muros de mampostería no reforzada y reforzada con mortero y malla electrosoldada por una sola de las caras, con la misma malla electrosoldada y el mismo sistema de anclaje de la malla al muro. Se hicieron ensayos de compresión y tracción diagonal en probetas pequeñas; mientras que los ensayos de carga lateral monotónica y dinámica en el plano del muro se realizaron en muros a escala real. Los resultados muestran que el comportamiento de los muros reforzados es mejor el de los no reforzados pues su capacidad de carga es superior, las fallas fueron progresivas y menos frágiles.

Se realizaron ensayos de compresión en prismas de mampostería no reforzada de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 3495 (ICONTEC 2003). Los prismas estaban compuestos por dos unidades con una junta intermedia pegada con mortero sobre toda la superficie y con una altura mayor de 300 mm de acuerdo con la NTC mencionada. La carga fue aplicada con una máquina Shimadzu de capacidad 1000 kN y se emplearon platinas de acero adosadas al cabezal de la máquina para garantizar la aplicación uniforme de las cargas. Se instrumentaron dos caras laterales con deformímetros mecánicos con una precisión de 10-2 mm.

Se presenta solamente los resultados de las pruebas realizadas en muros construidos con unidades de perforación horizontal no reforzados y reforzados por solo una de las caras del muro.

Esta investigación ejecuta una serie de ensayos que comparten muchos procedimientos en la metodología que sirven de guía y como parámetro a la hora de llevar a cabo las pruebas a muretes que se estudiaran en la presente investigación.

- **Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales** (Tena Colunga, Juárez Ángeles, & Salinas Vallejo, 2007).

En el 2007, el profesor del departamento de materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco de México DF, Arturo Tena Colunga y sus estudiantes de Maestría en Estructuras, presentan en un artículo los resultados más relevantes del ensayo cíclico de dos muros de mampostería combinada y confinada. Los ensayos se realizaron conforme al protocolo para ensayos cíclicos establecido en el Apéndice A de las Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004), por lo que los especímenes se sujetaron a ciclos repetidos, primero ante cargas dadas (hasta la carga de agrietamiento), y después a deformaciones (distorsiones angulares) impuestas de manera creciente. Se valoran tanto los mecanismos resistentes, como las características de deformación de esta modalidad de mampostería, definiendo parámetros útiles para fines de análisis y diseño.

El tipo de mampostería objetivo de la investigación, obedece a una modalidad de origen autóctono con antecedentes en algunas construcciones coloniales donde se alternaban piedras naturales con ladrillos. Dichas técnicas de construcción rescatan algunos materiales propios del periodo colonial de México, y se están implementando como una alternativa económica lo cual justifica la investigación de las propiedades y comportamientos de estos sistemas constructivos poco estudiados.

Se presentaron los resultados más relevantes de todo un protocolo de pruebas experimentales que culminaron con el ensayo cíclico de dos muros de la mampostería combinada y confinada que se emplea actualmente en zonas sísmicas de México, siendo éstos los primeros en realizarse en el mundo para esta modalidad de mampostería.

De los resultados experimentales se concluye que esta modalidad de mampostería, conforme a las NTCM-2004, es apta para resistir cargas laterales por sismo, si se emplea mortero tipo I en su pega y se confina conforme a los lineamientos de las normas de referencia. Sin embargo, como esta modalidad se está construyendo con morteros de autoconstrucción muy distintos al mortero tipo I.

La mampostería combinada y confinada presenta similitudes con respecto a los muros confinados de tabique rojo recocido en cuanto a patrones de agrietamiento, distorsión de agrietamiento y distorsión de diseño, aunque su resistencia a cortante máxima, su capacidad de deformación última y sus propiedades índice son inferiores a la de los muros construidos exclusivamente con tabiques de barro recocido. Las disminuciones en las propiedades globales de la mampostería combinada parecen estar relacionadas con las pobres propiedades mecánicas de los bloques empleados, por lo que también sería importante valorar esta modalidad con bloques producidos con un mayor control de calidad. Además, deben valorarse cómo influyen en la resistencia y capacidad de deformación otros aparejos de bloques y ladrillos que actualmente se utilizan.

No realizan comparaciones con las propiedades de mampostería colonial, pues el sistema constructivo no es completamente antiguo, ya que combina algunos materiales y técnicas diferentes a los de la época. Sin embargo se llevan a cabo ensayos destructivos que se aplicaran en este proyecto.

- **Obras de emergencia para la consolidación parcial de las murallas de Toledo, España (IPCE, s.f.).**

El objetivo de la intervención fue garantizar la preservación, consolidación y el mantenimiento de las murallas a través de la integración, evitando la reconstrucción y la alteración del aspecto del monumento en su realidad actual.

El Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, ha concluido las obras de emergencia para la consolidación parcial de dos lienzos de las murallas de Toledo anexos al Puente de San

Martín. Con esta actuación, no sólo se consigue preservar un bien emblemático del patrimonio cultural de la ciudad, sino que se garantiza la seguridad de peatones y visitantes.

Los tramos sobre los que se ha actuado se encontraban en un preocupante estado de deterioro y habían causado derrumbes, lo que suponía un riesgo para Las personas que circulaban en las proximidades del recinto. La principal causa de estas lesiones y pérdidas de material residía en la acción de las aguas de escorrentía, así como en las raíces de determinadas especies vegetales parasitarias arraigadas junto a los muros. Por este motivo se ha procedido a limpiar y tratar los terrenos, mejorando los elementos de drenaje de la propia muralla y su entorno con vistas a asegurar una correcta evacuación de las aguas.

La intervención se ha llevado a cabo evitando reconstrucciones o añadidos que pudiesen alterar el aspecto actual del monumento. Siguiendo este criterio, se han consolidado las fábricas y las coronaciones de muros y torreones empleando técnicas tradicionales. Para ello se han reutilizado los materiales originales recuperados in situ, recurriendo a otros nuevos de naturaleza análoga, cuando lo anterior no era posible. Las obras, que se han desarrollado bajo el debido control arqueológico, también han contemplado el rellenado de los muros con mampostería de cal y canto, la inyección de lechadas de cal, además de rejuntados y entonados generales.

- **Kanan María Isabel. Argamasas de cal en la restauración de fortificaciones, 2006** (Kanan, 2006).

Este artículo aborda de una manera muy completa el tema conceptual, metodológico y preventivo del uso de la cal en la conservación y restauración del patrimonio de fortificaciones Brasileñas. Se basa en la tendencia actual para la conservación sostenible de los bienes culturales que orienta la elección de los materiales utilizados en los trabajos de intervención; se detiene sobre la relevancia y el alcance histórico cultural del patrimonio fortificado en Brasil; describe las características de construcción y propiedades de los parámetros, las argamasas, y los problemas para la conservación de estos bienes a través de ejemplos; especifica una serie de estudios previos que van desde la recolección de datos históricos, hasta los análisis realizados en laboratorios para la caracterización de las



argamasas. Por último, propone algunas orientaciones prácticas para el uso de la cal en obras de conservación y directrices generales que apoyen los proyectos y programas comunes de colaboración técnica.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. FORTIFICACIONES DE CARTAGENA DE INDIAS

Cartagena de Indias era una plaza fuerte y fue la construcción de una muralla real perimetral, con sus baluartes, la máxima que regía o determinaba en su diseño y construcción. Es imposible no caer en la sensación de que se estaban haciendo grandes fortificaciones con una tendencia estilística determinada, algo de ello, por sentido común, traspasó a la arquitectura civil de la ciudadela o plaza fuerte y su arquitectura industrial militar.

Pero también debemos se debe apelar, al rigor científico, hablar de que los mejores constructores alarifes, albañiles de la ciudad, estarían bastante ocupados en esa incesante actividad, de construir fortificaciones, y pocos o algunos quedarían para erigir casas, u otro tipo de edificios, si alguien pensaba en construir alguna obra civil, durante dicho proceso, con toda seguridad no obtendría la mejor mano de obra, esta no sería de las más calificadas, esto es constatable, en la impecable factura de las fortificaciones que requerían de la mejor mano de obra, la mejor selección de materiales. Todo ello tomaba como base la fortaleza de la industria de los hornos, gracias a su existencia se pudieron construir un rosario de fortificaciones de Tierra bomba y Barú, estaba claramente destinada a los fuertes, no a las iglesias ni a las viviendas de los residentes, es por ello que este fuero militar de Cartagena incidió en la diferencia de calidades entre las obras civiles y militares y restringió, estas edificaciones, a la austeridad y en la burda tosquedad de la cual, el producto resultado de los hornos; la cal, era el material principal, que sin embargo definió la personalidad de la arquitectura domestica cartagenera y es, en esa humildad técnica que radica la singular belleza del centro histórico de la ciudad (Martínez Vásquez & Cabrera Cruz).

Muchas de esas aparentes limitantes incidieron que en algunos momentos los elementos de albañilería mudéjar, reflejados en columnas, arcos, pañetes y cornisas, florecieran, en el entendido de que eran técnicas humildes, que sin embargo, para suerte de la historia, subsisten obstinadamente en muchos ejemplares no militares de la ciudad.

Por un momento se puede imaginar que todo ese invaluable esfuerzo de erigir cerca de cien fortificaciones, quince iglesias, diez conventos, mil setecientas casas, más de once kilómetros de fortificaciones, cerca de ocho kilómetros de diques o murallas submarinas y número no determinado de obras hidráulicas como lo son tres mil metros lineales de túneles y setecientos cincuenta aljibes; todos estos necesitaban como materia prima la piedra caliza de las canteras y la cal que servía para pegar los morteros o hacer “hormigones” la cual se asoma por todas sus juntas de construcción de los muros, realizados en 300 años, a partir de los insumos aportados por la vasta red de canteras , tejares, campamentos de trabajo, de los que hasta la fecha han sido ubicados, treinta siete hornos de deshidratación de piedra caliza, de un total aproximado, en la colonia, de cerca de cincuenta unidades, de hornos , industria estratégica, de esa cantidad Barú contaba con nueve. Si se hubiese dedicado exclusivamente a obras civiles, no cabría, la menor duda, que Cartagena, entre todas, sería una de las ciudades más esplendorosas de América.

Pero cabe también la afirmación, si Cartagena de Indias no hubiera desarrollado su potencial militar, y por ende su industria de los hornos, si esta, no hubiese sido de interés, para la corona Española, se estaría acaso observando un anónimo villorrio de la costa del Caribe, Colombiano. No en vano la ciudad, que subsiste hoy, consiste precisamente en la increíble infraestructura construida y desarrollada en ese periodo colonial.

4.1.1. Generalidades de las murallas

Se denomina muralla a un muro cerrado destinado a la protección y defensa de un determinado sitio. Las cuales se construían con el fin de proteger una ciudad aunque también existieron para la delimitación de fronteras entre pueblos. Las murallas más antiguas existentes y las más conocidas suelen ser obras de albañilería con piedra, cemento o ladrillo.

Los elementos que conforma la muralla, en función del sistema constructivo utilizado, se pueden clasificar así:

Escarpa: Plano inclinado que forma la muralla de algunas fortificaciones, la muralla de la ciudad de Cartagena de Indias está formada por sillares semilabrados de piedra coralina.



Ilustración 1 – Escarpa
Fuente: (Turismo en fotos, s.f.)

Contraescarpa: Pared opuesta a la escarpa la cual se encuentra constituida por un mortero colonial fabricado con material mixto; argamasa, cascajos de teja, trozos de ladrillo, piedra caliza y piedra coral.



Ilustración 2 – Contraescarpa
Fuente: (Google, s.f.)

Plataforma: Conformado por el terraplén localizado entre la escarpa y la contraescarpa en cuya parte superior se encontraba una capa de rodadura compuesta por un mezcla de argamasa, arena lavada y agregado grueso formando así un mortero colonial dispuesto a resistir todas las cargas generadas por el tránsito de personas y arsenales militares.



Ilustración 3 – Plataforma
Fuente: (Turismo en fotos, s.f.)

Garita: Torrecilla con ventanas largas y estrechas que se coloca en un puntos salientes de las fortificaciones para abrigo y defensa de los centinelas.



Ilustración 4 – Garita
Fuente: <http://www.eluniversal.com.co/sites>

4.2. MATERIALES ANTIGUOS DE CONSTRUCCIÓN

Los centros de producción de materiales, eran una gran industria colonial conformada por haciendas, estancias y campamentos con múltiples funciones como tejares, canteras, hornos de cal y ladrillos, aljibes, albercas de apagado de cal, brocales de pozos de agua, casa del encomendero o capataz, cocinas y casa de médicos. También se encontraban galpones para almacenar el material, para vivienda de los presos, esclavos y libertos, quienes trabajaban en la producción de los mismos.

Todos estos se encontraban ubicados en cercanías de cuerpos de aguas para facilitar su transporte y protegidos por la presencia de vegetación frondosa, que les permitía un encubrimiento de posibles ataques enemigos y así mismo, para la obtención de carbón vegetal o leña, haciendo que no importara la dificultad de su explotación o el transporte sino la buena calidad del yacimiento (Herrera Díaz, 2009).

A continuación se dará a conocer una breve descripción de los principales materiales utilizados en el cordón amurallado.

4.2.1. Rocas calizas

Roca sedimentaria compuesta en más de un 90% por carbonato de cálcico. Este tipo de rocas puede presentar un aspecto muy variable, pero todas ellas se caracterizan por ser rocas de aspecto pétreo (duro), efervescer fuertemente con ácido clorhídrico en frío al 10% y presentar fracturas más o menos concoides. Se produce por la precipitación del carbonato cálcico con la intervención del agua en un proceso inorgánico y/o bioquímico. El calcio proviene de la meteorización de minerales que lo contienen (piroxenos, anfíboles o plagioclasa) que, junto al anhídrido carbónico de la atmósfera, de lugar a la reacción siguiente que depende de la presión y temperatura.

Pero la mayor parte de calizas proceden de la intervención de organismos que toman de las aguas los elementos para formar sus conchas y caparazones (corales, algas, foraminíferos, etc.) Al morir, se produce una acumulación de estas partes que se unen por un cemento calcáreo, generado a la vez por la sedimentación o por procesos diagenéticos.

En el entorno cartagenero se encuentran en las colinas de Albornoz, incrustadas horizontalmente sobre arcillas y otras rocas que afloran en sus valles, situados a 8 km de la ciudad sobre la carretera que va hacia el complejo industrial de Mamonal y cuyas reservas se estiman en 75 millones de toneladas. Otro yacimiento importante es el de Turbaco, estimado en 1450 millones de toneladas tomado como base un área de 58 km².

Históricamente las mayores explotaciones de piedra caliza de Cartagena estuvieron ubicadas en las laderas de la popa en la denominada cantera de Tesca, otra importante explotación fue la cantera de Tierrabomba en el sitio del Tejar de San Bernabé de los Jesuitas contigua a la plataforma de Santangel, 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 (Cabrera Cruz, Martelo Osorio, Martinez Sagrera, & Martínez Vázquez, 1991).

4.2.2. La cal

Es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio).

Los tipos de cal más conocidos son:

- **Cal Viva:** Se obtiene de la calcinación de la caliza que al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique a la construcción.

- **Cal Hidratada:** Se conoce con el nombre comercial de Cal Hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos.

La cal apagada o hidratada en pasta tiene la propiedad de endurecerse lentamente en el aire, enlazando los cuerpos sólidos, por lo cual se emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado, y es debido primeramente a una desecación por evaporación del agua con la que se formó la pasta, y después una recarbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire.

4.2.3. Ladrillo militar

Bloque de arcilla o cerámica cocida empleado en la construcción de muros y revestimientos decorativos. Los ladrillos pueden secarse 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.

El ladrillo es el elemento más importante en la albañilería de la ciudad de Cartagena se encuentra en variadas proporciones 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; 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 almagre 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 (Herrera Díaz, 2009).

4.2.4. Piedra coral

La historia de la piedra coral se remonta al periodo pleistoceno y debe su nombre a la composición principalmente de corales, fósiles de especies marinas y algunos minerales que durante varios siglos buscaron acomodo en el fondo del mar. Esta piedra se utiliza desde tiempos de la colonia para erguir las impresionantes fortalezas y otras edificaciones, muchas de las cuales pertenecían a la realeza. En las fortificaciones de la ciudad, se encuentra inmersa en la mampostería colonial tipo mixta producida por la técnica de construcción de cascoteo, en la cual estaba acompañada por trozos de teja o ladrillo, piedra caliza y argamasa.

4.2.5. Argamasa

Mortero y material base compuesto por una mezcla de arena, agua y cal, este último el conglomerante, en este caso que al secarse adquiere una condición bastante sólida inferior a la del hormigón. En su mezcla de la argamasa toma especial importancia el empleo de los áridos los materiales naturales como la arena, grava y gravilla. Esta mezcla fue utilizada en todo el sistema constructivo fabricado anteriormente hasta la aparición del cemento Portland en el siglo XIX-

Las mezclas dosificadas de cal y arena eran muy variables de acuerdo al tipo de construcción y las condiciones de la obra; la relación volumétrica más utilizada establece una parte de cal y dos partes de arena lavada de río (1:2).

En Cartagena se utilizaba el hormigón, una especie de mezcla “ciclópea” a la cual se le añadía además de la cal y la arena pedazos de piedra burda y cascajos de ladrillo o teja (1: 2:4) (Herrera Díaz, 2009) .

4.3. ESFUERZO NORMAL Y DEFORMACIÓN UNITARIA

Si se considera una barra prismática, con sección transversal constante en toda su longitud, cargada con fuerza axial P en los extremos (ver Ilustración 5), la barra presenta un cambio

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

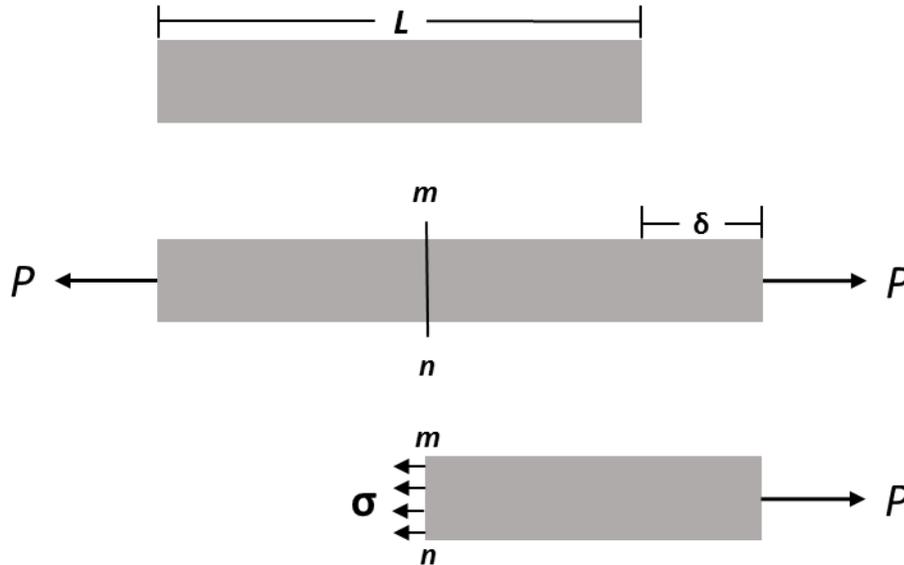


Ilustración 5 - Barra sujeta a tensión
Fuente: Adaptada (Timoshenko & Gere, 1986)

Efectuando el corte imaginario (mn) de la imagen #5, la carga (P) actúa sobre el extremo derecho del cuerpo libre; en el otro extremo ocurren fuerzas que representan la acción de la parte izquierda de la barra sobre la sección transversal. La intensidad de la fuerza (esto es, la fuerza por unidad de área) se denomina esfuerzo y se denota por la letra griega “ σ ”. Si se supone que el esfuerzo tiene una distribución uniforme sobre la sección transversal, se aprecia fácilmente que su resultante es igual a la intensidad (σ) multiplicada por el área transversal (A) de la barra. Por lo tanto, siendo consecuentes con el equilibrio de fuerzas, esta resultante debe ser de igual magnitud y de dirección opuesta a la carga aplicada (P). De lo anterior se obtiene la ecuación 1:

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

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

La variación total en longitud que sufre un elemento al aplicársele una carga se denota por la letra griega “ δ ”. En el caso de la barra, el alargamiento constituye el resultado acumulativo del estiramiento del material sobre la longitud (L) de la barra. Con base a esto, el concepto de alargamiento por unidad de longitud, o deformación unitaria, denotada por la letra griega “ ε ”, se determina por la ecuación 2:

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

4.4. ENSAYO DE MATERIALES

Las propiedades mecánicas de los materiales usuales en ingeniería se determinan mediante pruebas efectuadas sobre muestras pequeñas de material en laboratorios especializados que permiten obtener valores precisos y normalizados. Existen distintos ensayos que permiten conocer diferentes propiedades y características del material.

Los ensayos destructivos son muy importantes ya que muestran el desempeño de los materiales en distintas situaciones, y como consecuencia producen daño o rotura total de la pieza sometida a la prueba, lo cual hace que su uso sea restringido en el estudio de obras con reconocimientos patrimoniales y legados culturales importantes.

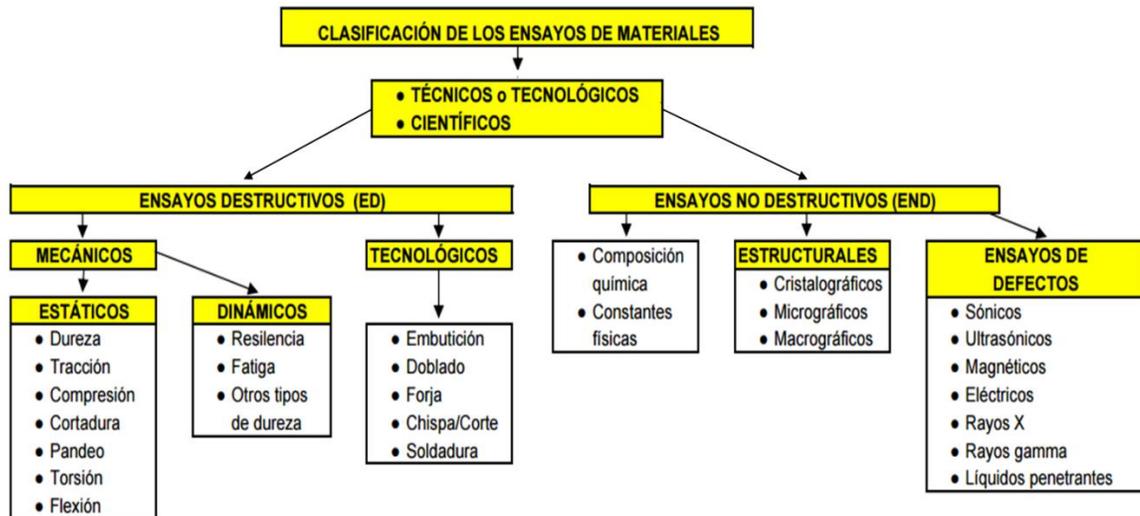


Ilustración 6- Tipos de ensayos.

Fuente: (Jimenez, s.f.)

Por otro lado, los ensayos no destructivos consisten en la aplicación de ciertas pruebas o ensayos sobre un objeto para verificar su calidad sin modificar sus propiedades, estado original, condiciones de uso o aptitud para el servicio. Están basados en principios físicos y de su aplicación se obtienen los resultados necesarios para establecer un diagnóstico de su estado o calidad del objeto inspeccionado.

4.4.1. Métodos de ultrasonido

El ensayo de ultrasonidos es un método de ensayo no destructivo que se basa en el uso de una onda acústica de alta frecuencia, no perceptible por el oído humano, que se transmite a través de un medio físico, para la detección de discontinuidades internas y superficiales o para medir el espesor de paredes entre otras aplicaciones.

Para llevarlo a cabo se utiliza un material piezoeléctrico insertado dentro de un palpador (Ilustración 7). Ese cristal piezoeléctrico transmite a la pieza una onda ultrasónica que se propaga a través de la pieza y que es detectada por el receptor, originando una señal eléctrica que es amplificada e interpretada por el equipo de medida.

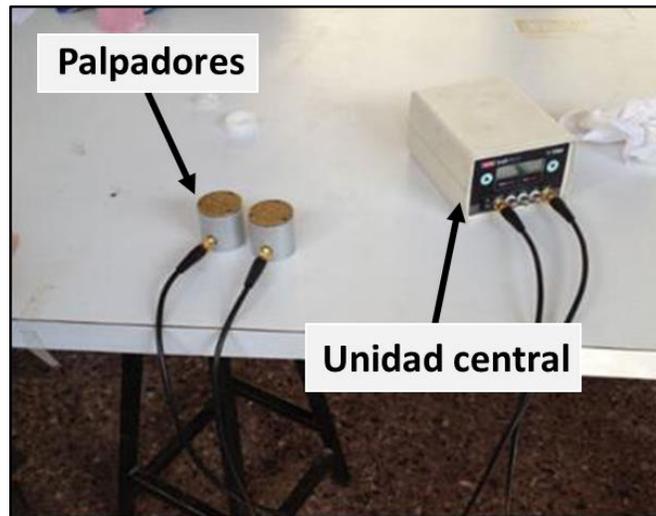


Ilustración 7 - Equipo de ultrasonido

Fuente: Adaptada (LLopis)

En la ilustración 8 se muestran las opciones para instalar los transductores en la superficie de prueba de la probeta. La transmisión puede ser directa, semidirecta o indirecta.

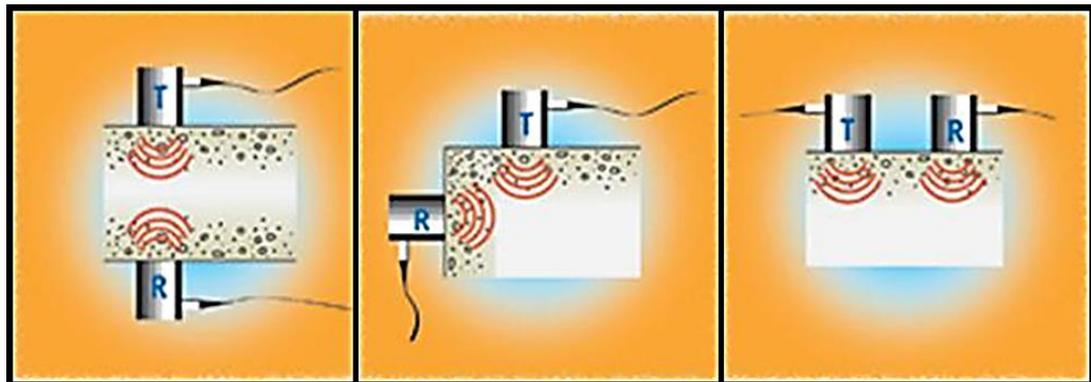


Ilustración 8 - Trasmisión directa, semidirecta e indirecta.

Fuente: (LLopis)

Mientras sea posible deberá utilizarse la transmisión directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida. Sin embargo, algunas veces tiene que examinarse el hormigón mediante el uso de trayectorias diagonales y, en estos casos, la semidirecta puede usarse teniendo en cuenta que la distancia que se va a medir será en diagonal.

La transmisión indirecta es la menos satisfactoria, ya que además de su relativa insensibilidad, nos da medidas de la velocidad de pulso que usualmente tienen la influencia

de la capa de hormigón cercana a la superficie, que no serán representativas del hormigón en estratos más profundo.

El primer resultado que se obtiene de los datos recopilados es la velocidad de pulso al atravesar el elemento ensayado, la cual se obtiene mediante la ecuación 3:

$$\text{Velocidad de pulso} = \frac{\text{distancia entre transductores}}{\text{lectura de tiempo}} \quad (3)$$

La velocidad se determina para las tres lecturas realizadas a cada elemento y, posteriormente, se obtiene un promedio. Esta velocidad de pulso es la más conveniente. Con este dato, podemos determinar la calidad del elemento probado, entre otras características, consultando algunos de los criterios de correlación.

4.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MAMPOSTERÍA (f'_m), SEGÚN LA NSR-10

El título D de la NSR-10 indica tres diferentes maneras para la determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería se acuerdo a uno de los siguientes procedimientos:

- a) Por medio de registros históricos.
- b) Por determinación experimental sobre muretes de prueba.
- c) Por medio de ensayos sobre materiales individuales.

4.5.1. Determinación experimental sobre muretes de prueba.

El valor de f'_m para una muestra debe ser el promedio obtenido del ensayo de por lo mínimo tres muretes de igual procedencia. El valor de cada ensayo se obtiene de dividir la carga última obtenida entre el área neta del murete:

$$f'_m = \frac{\text{Fuerza ultima}}{\text{area del murete}} \quad (4)$$

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

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

*Tabla 1- Factor de corrección por esbeltez para f'_m .
Fuente: NSR-10*

El número de muretes por muestra influye en el valor final de f'_m de la siguiente manera:

- **Más de 30 ensayos previos a la obra:** Cuando el número de muretes ensayados sea superior o igual a 30, f'_m se puede tomar como el 85% del valor promedio de los ensayos realizados.
- **Entre de 10 y 30 ensayos previos a la obra:** Cuando el número de muretes ensayados sea superior a 10 e inferior a 30, f'_m se puede tomar como el 80% del valor promedio de los ensayos.
- **Menos de 10 ensayos previos a la obra:** Cuando el número de muretes ensayados sea inferior a 10 pero no menor de 3, f'_m se puede tomar como el 75% del valor promedio de los ensayos.

4.5.2. Cálculo del módulo de elasticidad según la NSR-10

El valor para el módulo de elasticidad de la mampostería se debe establecer por medio de ensayos de laboratorio de muretes fabricados y ensayados como se indica en D.3.7.2, calculando en la curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo la pendiente de la secante desde $0.05f'_m$ hasta $0.33f'_m$. Los registros históricos del módulo de elasticidad determinado

experimentalmente para proyectos en construcción, pueden utilizarse en diseños posteriores de obras con materiales similares. En ausencia de los valores experimentales, pueden emplearse los siguientes:

- Para mampostería en concreto

$$E = 900f'm < 20\ 0000Mpa \dots (5)$$

- Para mampostería en arcilla

$$E = 750f'm < 20\ 0000Mpa \dots (6)$$

4.6. REGRESIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

Es común que los datos experimentales se den como valores discretos, y es posible que se requiera estimar el valor de un punto entre estos valores, realizar predicciones o probar hipótesis. Además, se puede necesitar una versión simplificada de una función complicada. Las aplicaciones para esto se conocen como ajuste de curvas, porque en general no se conoce la curva exacta y tan solo se halla una curva aproximada (Ortiz Quintana, 2005).

4.6.1. Regresión lineal

La regresión lineal es una técnica para determinar la mejor línea recta que pasa entre un conjunto de observaciones definidas por puntos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ... (x_n, y_n) . La ecuación puede expresarse como:

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (7)$$

Dónde:

y : es el valor verdadero

a_0 y a_1 son la ordenada al origen y la pendiente de la línea recta respectivamente.

e : Es el error o diferencia entre el modelo y las observaciones, el cual se representa al reordenar la ecuación como: $e = y - a_0 - a_1x$.

$a_0 - a_1x$: Es el valor pronosticado de la variable dependiente.

Respecto a la cuantificación del error, la media aritmética (\bar{y}) de una muestra se define como la suma de los datos individuales (y_i) dividida entre el número de puntos (n), o:

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \text{ de } i = 1 \dots n$$

La desviación estándar (S_y) es la medida más y común del espaciamiento de una muestra alrededor de la media: si las mediciones están muy espaciadas alrededor de la media, la desviación estándar será grande; si están agrupadas cerca de ella, será pequeña.

Donde S_t es la suma total de los cuadrados de los residuos entre los datos y una sola estimación de la medida de tendencia central (la media):

$$S_y = \sqrt{\frac{S_t}{n-1}}$$
$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

La varianza (S) es el cuadrado de la desviación estándar:

$$S = \frac{S_t}{n-1}$$

Para la evaluación de las ventajas del ajuste por mínimos cuadrados, el coeficiente de correlación (r) cuantifica la mejora o reducción del error originado por la representación de los datos por medio de una línea recta en vez de como un valor promedio. Antes de aplicar la regresión se calcula el S_t (suma total de los cuadrados alrededor de la media). Después de obtener la ecuación de la línea de regresión se calcula el S_r (suma de los cuadrados de los residuos alrededor de la recta de regresión), y que la magnitud de esta r cantidad depende de la escala; la discrepancia se normaliza a S_t para obtener:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (8)$$

Un coeficiente de correlación cercano a la unidad indica un buen ajuste, mientras que si es próximo a cero, el ajuste es pobre.

4.6.2. Regresión polinomial

En la ingeniería, aunque algunos datos exhiben un patrón marcado, son pobremente representados por una línea recta, entonces una curva será la más adecuada para ajustarse a los datos; una alternativa es ajustar polinomios a los datos mediante regresión polinomial.

Como ya hemos mencionado anteriormente, los polinomios son muy usados en los cálculos numéricos, por sus propiedades. La ecuación de un polinomio de grado n es:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

Apliquémosle el método de mínimos cuadrados. La curva propuesta es:

$$y_p = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n + e$$

Donde a_i son coeficientes y e es el error. Una estrategia es minimizar la suma de los cuadrados de los residuos (S_r), entre la y medida y la y calculada con el modelo lineal, está dada por:

$$S_r = \sum e_i^2 = \sum (y_{i \text{ medida}} - y_{i \text{ modelo}})^2 = \sum [(y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2] - \dots - a_nx_i^n)^2$$

Derivando parcialmente respecto a sus constantes nos queda que:

$$\frac{d}{da_0} S_r = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - \dots - a_nx_i^n)$$

$$\frac{d}{da_1} S_r = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)$$

Así sucesivamente hasta la n ecuación:

$$\frac{d}{da_n} S_r = \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_n x_i^n)$$

Estas ecuaciones de igualan a cero y se reordenan para desarrollar el siguiente conjunto de ecuaciones normales:

$$\begin{aligned} a_0 (m) + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_n \sum x_i^n &= \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_n \sum x_i^{n+1} &= \sum y_i x_i \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_n \sum x_i^{n+2} &= \sum y_i x_i^2 \\ a_0 \sum x_i^n + a_1 \sum x_i^{n+1} + a_2 \sum x_i^{n+2} + \dots + a_n \sum x_i^{2n} &= \sum y_i x_i^n \end{aligned}$$

Todas las sumatorias son desde $i = 1$ hasta m (donde m es el número de puntos). Los coeficientes de las incógnitas se pueden evaluar de manera directa a partir de los datos observados. El sistema es lineal y puede resolverse por los métodos conocidos. El error estándar estimado se formula de la siguiente manera:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{m - (n + 1)}} \quad (9)$$

5. METODOLOGÍA

Esta investigación (de tipo mixta), busco en primera medida conocer, mediante ensayos destructivos y no destructivos, la resistencia a la compresión de la mampostería colonial mixta presente en edificaciones virreinales y la contraescarpa de las murallas de Cartagena de Indias, para compararla con la obtenida de la prueba de muretes fabricados bajo criterios semejantes. Todo lo anterior se realizó con el fin de establecer criterios técnicos para labores de restauración y rehabilitación que garanticen la conservación y armonía funcional en el patrimonio.

El proyecto se realizó de forma ordenada como se muestra en los siguientes pasos:

5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se inició con una revisión bibliográfica de las investigaciones y estudios efectuados sobre los aspectos constructivos antiguos (sistemas de construcción, características y origen de materiales) aplicados en las edificaciones coloniales y fortificaciones del centro histórico de Cartagena de Indias. Esta búsqueda de información se complementó con consultas a profesionales e investigadores del tema.

Se llevó a cabo un recorrido al centro histórico con el propósito de ubicar los lugares donde se presenta el tipo de mampostería de interés, identificar los patrones y forma de los componentes de este material, y de establecer el número de puntos adecuados o sitios estratégicos sobre la contraescarpa de las murallas para aplicar las pruebas no destructivas de ultrasonido. La ilustración 9 muestra el recorrido realizado entre el Museo de Arte Moderno y el Baluarte de Santiago, en el cual escogieron siete puntos estratégicos con presencia de la mampostería estudiada donde se efectuaron una serie de mediciones (de 6 a 7 tomas por punto) de ultrasonido con el fin de obtener una resistencia a la compresión promedio en este tipo de fortificaciones.



Ilustración 9 – Localización del tramo de muralla ensayada

Fuente: <https://www.google.com/maps>

5.2. EXTRACCIÓN DE MURETES ORIGINALES EN EDIFICACIÓN COLONIAL

Para la obtención de los muretes en la edificación colonial ubicada en el Callejón de Los Estribos N° 20-240 del centro histórico, primero se realizó la identificación del tipo de mampostería presente en la casa para constatar que se tratara del mismo material estudiado (ilustración 10).



Ilustración 10 - mampostería colonial mixta presente en edificación del centro histórico

Fuente - Autores

Para llevar a cabo la extracción de una fracción de este material se hizo necesario la sustracción de grandes bloques (aproximadamente un metro cubico) para garantizar por exceso los volúmenes deseados de cada muestra. Estos bloques fueron extraídos y posteriormente forrados para protegerlos como se evidencia en las ilustraciones 11 y 12.



Ilustración 11 - Extracción del bloque de mampostería colonial mixta

Fuente – Autores



Ilustración 12 - Bloques de mampostería colonial mixta extraídos.

Fuente – Autores

Luego de la extracción, se usó pulidora y discos diamantados para concreto, para cortar y dar forma a los tres muretes deseados. Para esto se delimitaron márgenes de seguridad de aproximadamente de cinco centímetros adicionales a las dimensiones requeridas (ilustración 13), ya que la difícil manejabilidad y fragilidad de la pega no permitieron hacer cortes uniformes y continuos. Los muretes fueron trabajados hasta obtener la forma más próxima a la requerida.

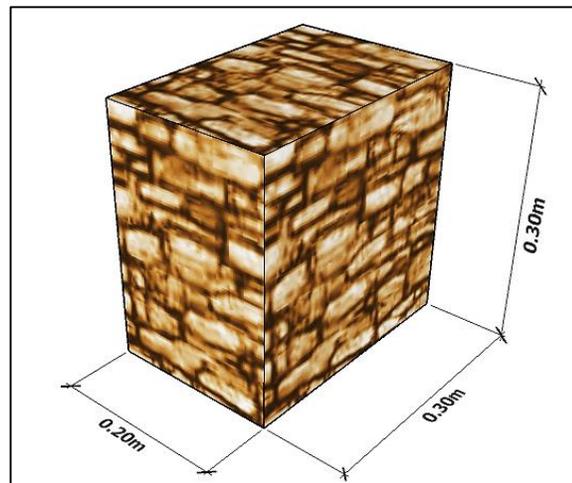


Ilustración 13 - Dimensiones requeridas.

Fuente – autores

Para asegurar la geometría necesaria para los ensayos, los tres muretes extraídos fueron pañetados, como lo muestra la ilustración 14 con argamasa de cal y arena lavada en proporciones 1:2 respectivamente, soportando este procedimiento en que originalmente este tipo de mampostería se encuentra pañetado en muchas de las edificaciones coloniales y segmentos de contraescarpa de la muralla.



Ilustración 14 - proceso de pañetado en muretes extraídos.

Fuente – autores

5.3. ELABORACIÓN DE MURETES DE MORTERO COLONIAL MIXTO

Para la elaboración de los muretes se tomó como referencia la proporción volumétrica 1:2:4 de argamasa, piedra coralina y piedra pómez, y pedazos de ladrillo respectivamente, según lo establecido por el arquitecto restaurador Alberto Herrera en “*Estudios y diseños técnicos para la restauración del lienzo de murallas entre el Monumento de La India Catalina y el Museo de la Marina*”. Los materiales se escogieron con base a las consultas previas de documentos investigativos y entrevistas a restauradores profesionales, con el fin de obtener los que presentan las mejores propiedades en la actualidad a la hora de efectuar intervenciones en el patrimonio.

Para preparar la argamasa en proporciones 1:2 de cal y arena respectivamente, se escogió la cal hidratada de marca NARÉ (que puede ser ensayada como un concreto normal a los 28 días), debido a que esta presentó los mejores resultados de resistencia a la compresión en el trabajo de grado titulado “*Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de*

los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena” (Aguirre Castellar & Arrieta Torres, 2014).

El ladrillo y la arena fueron suministrados por la distribuidora RÚSTICOS Y ACABADOS S.A.S., siguiendo las recomendaciones del arquitecto restaurador Alberto Samudio Trullero.



Ilustración 15- Tableta militar.

Fuente – autores

Las rocas calizas (ilustración 16) se obtuvieron de la cantera “COLONCITO” localizada en el municipio de Turbaco por ser estas las que presentaron mayor resistencia a la compresión en las investigaciones anteriores (Meza & Cohen, 2011) (Rhenals Acuña & Santos De Ávila, 2012). En cuanto a las rocas pómez o pumita, los distribuidores actuales la obtienen de las diferentes intervenciones que se realizan en viviendas del centro histórico para luego revenderlas a los restauradores, por lo tanto se utilizaron las piedras pómez que restaron de la extracción del muro para la preparación de los morteros (ilustración 17).



Ilustración 16 – Roca coral

Fuente - Autores



Ilustración 17 - Roca Pómez.

Fuente – autores

Para la preparación del mortero colonial se fragmentaron los ladrillos, rocas coral y pómez a un tamaño que facilitara la manejabilidad y para asegurar la forma irregular que se observa de estos materiales en las distintas obras coloniales del centro histórico (ilustración 18). Se construyeron formaletas de madera en forma de cajón de 20x30x30 cm para garantizar la geometría rectangular requerida en los muretes para su posterior ensayo a compresión (ilustración 19). Se mezclaron los agregados gruesos con la argamasa previamente preparada

con las proporciones explicadas con anterioridad y se vertió este mortero colonial en las formaletas con el fin de obtener tres muretes fabricados con materiales de canteras actuales, como se puede apreciar en las ilustraciones 20 y 21.



Ilustración 18 - Material fracturado de canteras actuales.

Fuente – autores



Ilustración 19 - Formaletas de madera.

Fuente – autores



Ilustración 20 - Mortero colonial mixto.

Fuente – autores



Ilustración 21 - Murete colonial mixto en formaleta.

Fuente – autores

El mismo procedimiento se aplicó en la elaboración de tres muretes con fracciones de ladrillos, rocas pómez y calizas antiguas rescatadas al momento de la extracción de las muestras en la edificación colonial.



Ilustración 22 - Material antiguo rescatado.

Fuente – autores

5.4. DETERMINACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN

Antes de ser destruidos, los nueve muretes fueron sometidos a pruebas de ultrasonido (ilustración 23) con el fin de comparar las resistencias obtenidas por métodos destructivos y no destructivos. Los muretes fueron clasificados y etiquetados como lo muestra la tabla 2. Para este procedimiento se utilizó el equipo de marca Proceq y Modelo PUNDIT PL-200.



Ilustración 23 - Ultrasonido en muretes.

Fuente – autores

GRUPO	MUESTRA	CLASIFICACION
1	1	Muretes fabricados con materiales obtenidos de canteras actuales
	2	
	3	
2	4	Muretes fabricados con materiales antiguos rescatados de los restos de las muestras extraídas
	5	
	6	
3	7	Muretes originales extraídos de la casa colonial en el centro histórico
	8	
	9	

Tabla 2 - clasificación de muretes.

Fuente – autores

Los muretes fueron medidos previamente y ensayados a la compresión 61 días después de ser elaborados, en el laboratorio de BARRIOS PADILLA INGENIEROS S.A.S. siguiendo las recomendaciones descritas en el título D de la NSR-10. Durante la prueba se midieron las deformaciones ocurridas al aumentar la carga de cada murete.



Ilustración 24 - Ensayo de muretes a compresión.

Fuente – autores

Por último, se utilizaron las velocidades de onda obtenidas en las pruebas de ultrasonido en los muretes y las resistencias resultantes de los ensayos destructivos para obtener una calibración más cercana a la requerida para aplicar las pruebas in situ de ultrasonido en los en la muralla (ver ilustración 25), y así conocer la resistencia a la compresión en sitios donde es prohibido por la ley la extracción de muestras.



Ilustración 25 - Ensayo de ultrasonido en la contraescarpa de la muralla.

Fuente – autores

5.5. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

Todos los resultados obtenidos fueron organizados y posteriormente tabulados y graficados para facilitar su comprensión y entendimiento. Luego fueron comparadas las resistencias de los muretes extraídos con los fabricados con materiales actuales y del mismo modo con los hechos de materiales antiguos. Se analizaron los patrones de falla y las magnitudes que resultaron de los ensayos. Además se evaluó la pertinencia de las pruebas de ultrasonido en muretes y en la contraescarpa analizando y comparando estos resultados.

Por último se realizaron graficas de esfuerzos contra deformación de cada murete con el fin de analizar el comportamiento mecánico de este mortero colonial mixto.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Siguiendo la metodología anteriormente descrita, se obtuvieron resultados a partir de los ensayos destructivos y no destructivos realizados sobre los muretes extraídos, los fabricados con materiales antiguos, los hechos con materiales actuales y la contraescarpa de la muralla. Estos resultados y su respectivo análisis se presentan a continuación.

6.1. RECONOCIMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA

Del recorrido realizado y la inspección al material restante de la extracción del bloque de mampostería colonial mixta en la edificación ubicada en el centro histórico, se pudo identificar cada uno de los materiales que en la teoría se describen como elementos indispensables en la elaboración de este tipo de mortero, pero también se evidenció que no existe un patrón determinado en la disposición espacial de cada agregado o un tamaño nominal para estos, e incluso la inexistencia de una proporción volumétrica que brinde una idea del contenido porcentual de cada componente de este tipo de mampostería.

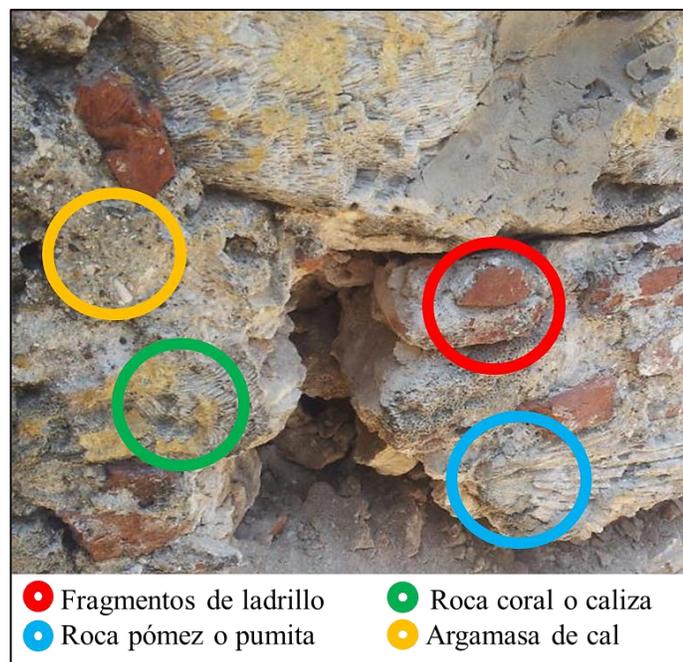


Ilustración 26 - Identificación de los componentes del mortero colonial mixto.

Fuente – autores

6.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN MURETES

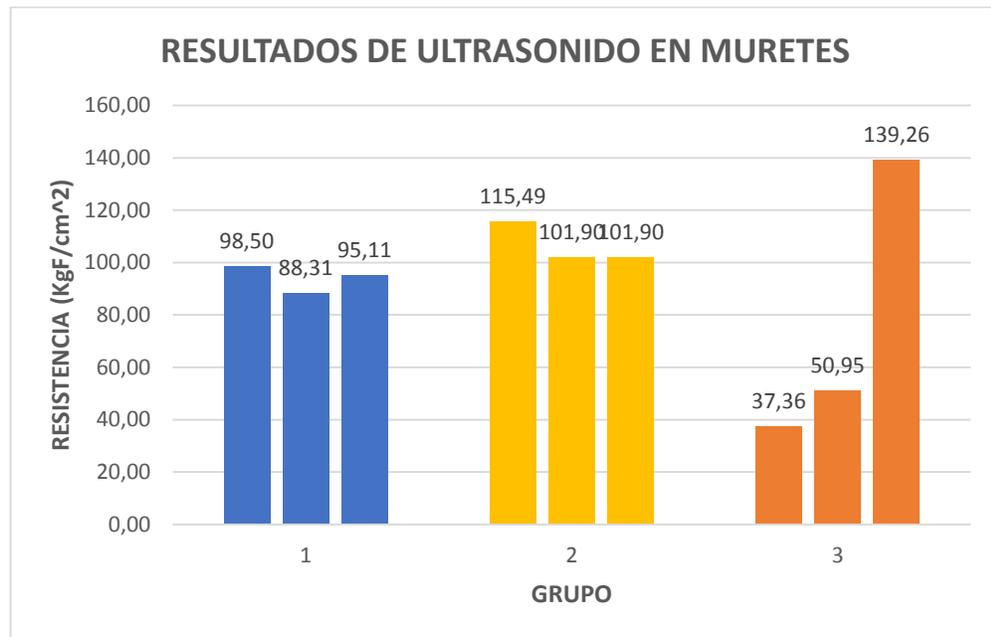
6.2.1. Ensayo no destructivo

Los resultados de resistencia por ultrasonido en los muretes fueron obtenidos luego de calibración del equipo por medio de mediciones de velocidad de onda que se tomaron en cada murete antes de ser destruidos y los resultados de las pruebas a compresión. Teniendo en cuenta la numeración y clasificación expuesta en la tabla 2, se resumen en la tabla 3 los datos obtenidos mediante las pruebas no destructivas en los muretes.

RESULTADOS		R1	R2	R3	PROMEDIO POR MURETE
		Kg-f/cm ²	Kg-f/cm ²	Kg-f/cm ²	
GRUPO	MURETE				
1	1	101,9	101,9	91,71	98,50
	2	91,71	91,71	81,52	88,31
	3	101,9	81,52	101,9	95,11
RESISTENCIA PROMEDIO (Kg-f/cm²)					93,97
2	4	122,28	112,09	112,09	115,49
	5	101,9	101,9	101,9	101,90
	6	112,09	91,71	101,9	101,90
RESISTENCIA PROMEDIO (Kg-f/cm²)					106,43
3	7	40,76	40,76	30,57	37,36
	8	40,76	61,14	50,95	50,95
	9	142,66	122,28	152,85	139,26
RESISTENCIA PROMEDIO (Kg-f/cm²)					75,86

Tabla 3 - resultados ultrasonido en muretes.

Fuente – autores



Gráfica 1 – Resultados ultrasonido en muretes.

Fuente – autores

Se realizaron 3 mediciones por murete y se promediaron los valores por cada grupo de estos, obteniendo resistencias de 93,97 Kg-f/cm² para los muretes fabricados con materiales adquiridos de distribuidores actuales, 106,43 Kg-f/cm² para los elaborados con materiales antiguos rescatados durante la extracción y 75,86 Kg-f/cm² para los muretes extraídos de la edificación colonial. Estos valores superan en gran medida a los obtenidos empíricamente expuestos en estudios previos (España Moratto, Puello Mendoza, & Almanza Vasquez, 2009) para este tipo de mampostería.

La grafica 1 muestra claramente que el grupo 3 de las muestras (muretes originales) registran el valor más bajo y alto del ensayo con una gran diferencia entre sus magnitudes, lo que comprueba una frecuente variación en la composición de la mampostería colonial mixta original y anula la validez de cualquier proporción establecida de los materiales que la constituyen, pues las muestras de los grupos 1 y 2 fueron elaborados con una mezcla proporcionada (1:2:4 de argamasa, rocas caliza y pómez, y fragmentos de ladrillos) y a diferencia del grupo 3, estas presentaron una dispersión despreciable entre sus valores.

Al comparar los resultados de los grupos 1 y 2, se observa que los muretes elaborados con materiales antiguos rescatados superan por una pequeña cantidad a los realizados con los materiales que se utilizan actualmente. Es decir, el mortero colonial hecho con los materiales de la actualidad presenta una menor resistencia que el mortero hecho con materiales antiguos, aunque mayor a la presentada por las muestras extraídas.

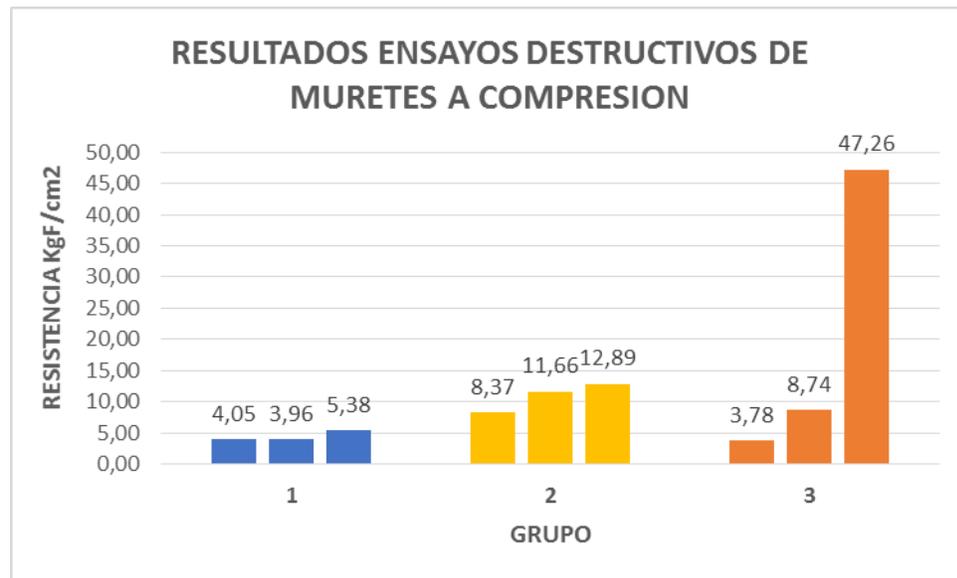
6.2.2. Ensayo destructivo

Las resistencias a compresión obtenidas en cada uno de los muretes fueron corregidas al multiplicarlas por un factor de esbeltez (0,86) acorde al Título D de la NSR 10 (ver tabla 1). La tabla 4 resume los valores resultantes de estos ensayos.

GRUPO	MUESTRA #	LADO (cm)	ANCHO (cm)	AREA (cm ²)	CARGA (Kg-f)	RESISTENCIA (Kg-f/cm ²)	
						Experimental	Corregida
1	1	20	20	400	1884,432	4,71	4,05
	2	19	19	361	1664,172	4,61	3,96
	3	17	16	272	1700,88	6,25	5,38
PROMEDIO						5,19	4,46
2	4	19	18	342	3328,344	9,73	8,37
	5	18	19	342	4637,664	13,56	11,66
	6	18	18	324	4857,924	14,99	12,89
PROMEDIO						12,76	10,98
3	7	17	18	306	1346,016	4,40	3,78
	8	17	18	306	3108,084	10,16	8,74
	9	18	18	324	17804,244	54,95	47,26
PROMEDIO						7,28	6,26

Tabla 4 - resultados de compresión en muretes.

Fuente – autores



Gráfica 2 – Resultados ensayo destructivo a compresión.

Fuente – autores

Como se puede observar, los resultados obtenidos para cada tipo de muestra fueron: $4,46 \text{ KgF/cm}^2$ para el grupo de muretes fabricados con materiales obtenidos de canteras actuales, $10,98 \text{ KgF/cm}^2$ para las muestras elaboradas con materiales antiguos rescatados y $6,26 \text{ KgF/cm}^2$ para los muretes extraídos de la edificación colonial. La grafica 2 muestra como para este último grupo de muretes se obtuvo una resistencia fuera de moda de los resultados la cual fue descartada para cualquier análisis y cálculo de la resistencia promedio. Esta elevada resistencia respecto al resto se le atribuye a que la muestra 9 consistía en todo el alto del murete a un núcleo central de piedra coralina rodeado de algunos fragmentos más pequeños de ladrillo, caliza y pómez, como se pudo observar después de ser destruido su recubrimiento por efecto de la carga (ver ilustración 27).



Ilustración 27 - Murete #9 luego de prueba a compresión.

Fuente – autores

Las resistencias obtenidas fueron mucho menores que las esperadas y planteadas en el rango de valores posibles que se establece en el artículo “*RESISTENCIA ESTRUCTURAL EMPÍRICA DE LA MAMPOSTERÍA DE TIPOLOGÍA COLONIAL EN CARTAGENA DE INDIAS*” el cual estima sin experimentación las posibles resistencias de 10 mezclas de mortero colonial mixto con distintas proporciones tanto en la argamasa como en sus agregados y obtiene valores que oscilan desde los $19,21 \text{ kgF/cm}^2$ hasta los $57,97 \text{ KgF/cm}^2$ (España Moratto, Puello Mendoza, & Almanza Vasquez, 2009).

Debido a todo lo anterior, se procedió a analizar el proceso de falla de los muretes al momento de ser ensayados y se pudo dictaminar que el componente que determinó dichas fallas fue la argamasa, pues fue la primera que perdió su forma y cohesión en todos los ensayos provocando el desprendimiento de los agregados (calizas y fracciones de ladrillos) y destrucción de los muretes antes de que los otros componentes sufrieran fracturas como se muestra en la ilustración 28. En cuanto al patrón inicial de falla, consistió en una fisura vertical con una leve inclinación que en la mayoría de los casos recorría toda la altura de las

muestras como se observa en la ilustración 29. Por lo tanto gran parte de la responsabilidad de estos bajos resultados se le atribuyen a la calidad de la cal que se produce hoy en día, pues la utilizada en este ensayo se trata de una cal hidratada o parcialmente apagada que no iguala a la utilizada en la época virreinal que era resultante de una selección muy exigente en la calidad de las rocas calizas y procesos artesanales de apagado que podían durar hasta años (Trallero, 2015).



Ilustración 28 - Proceso de falla en murete.

Fuente – autores



Ilustración 29 - Patrón de falla en muretes.

Fuente – autores

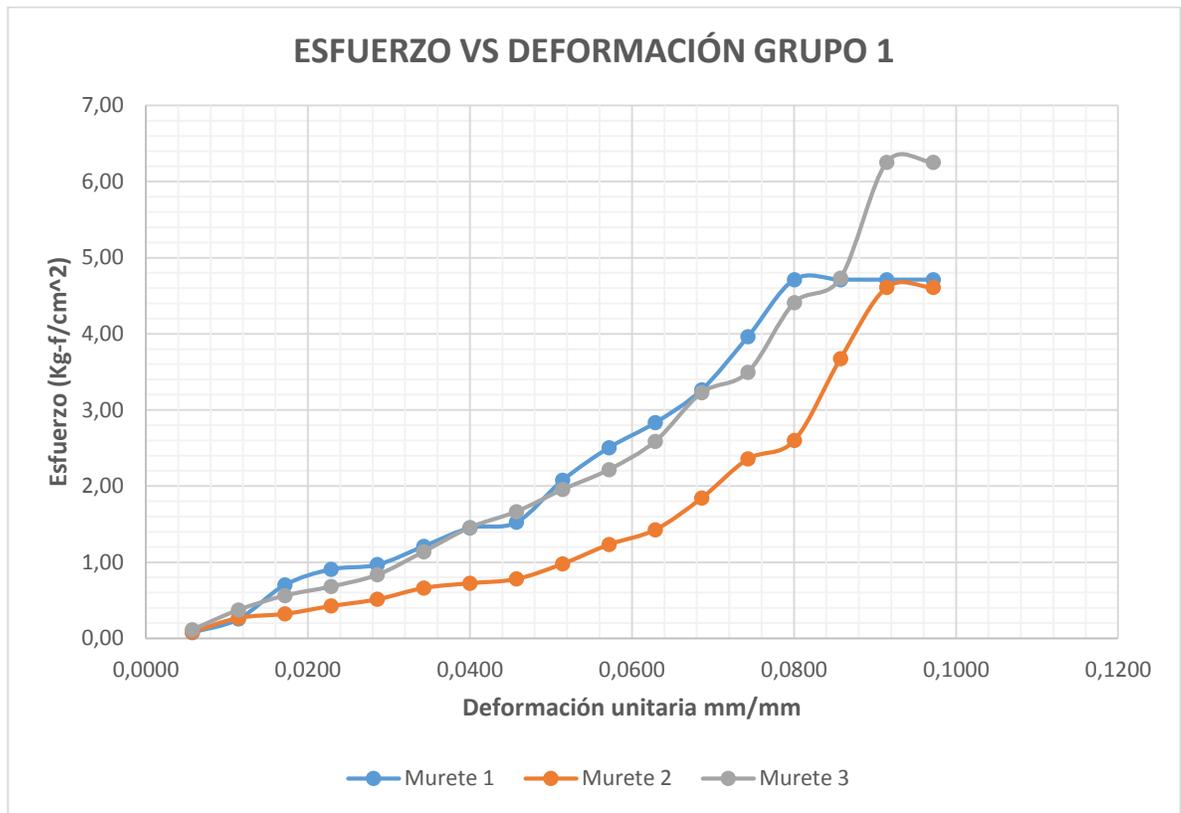
La poca resistencia en los muretes originales extraídos de la casa colonial, tiene su explicación en lo observado al momento de la sustracción de estos, ya que durante este proceso se evidencio la poca cohesión entre los componentes de estas muestras, la pega de argamasa entre las uniones de los agregados se desintegraba con facilidad y lucía deteriorada casi resumida a polvo, suceso que es entendible debido al largo tiempo que este tipo de estructuras han sobrevivido.

Por otra parte, entre los seis muretes que fueron fabricados para este ensayo, presentaron mayor resistencia aquellos que fueron realizados con los materiales rescatados durante la extracción en el muro colonial ($10,98 \text{ KgF/cm}^2$), frente a los elaborados con los materiales que se distribuyen actualmente ($4,46 \text{ KgF/cm}^2$) y con los cuales se realizan restauraciones y remodelaciones en este tipo de mampostería, superando en más del doble a este último resultado.

Con base a lo anterior se deduce que a pesar que la argamasa condicionó la falla de los muretes, existe una relación entre la calidad de los agregados (ladrillos y rocas calizas) y la resistencia de este tipo de material.

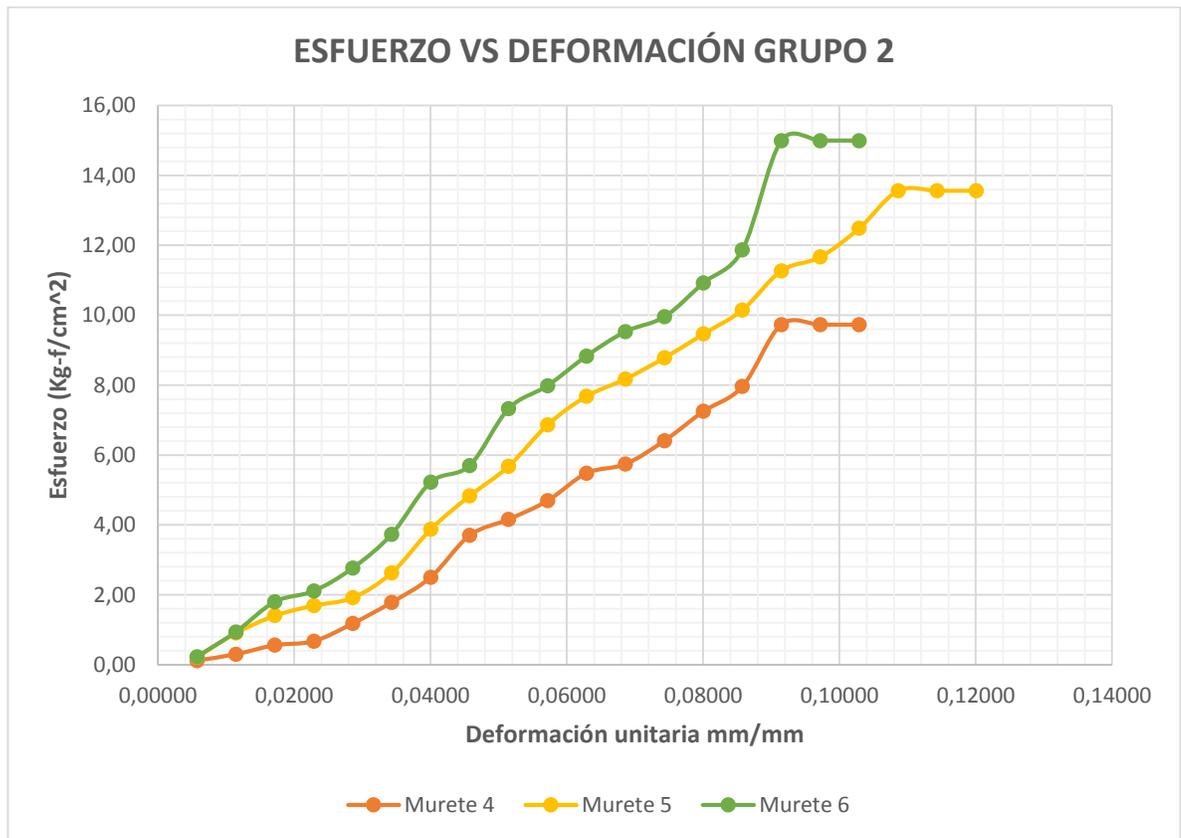
6.2.3. Esfuerzos contra deformaciones

Después de realizar los ensayos de compresión, se graficó el comportamiento que presentó cada murete durante la prueba como se muestra en las gráficas 3, 4 y 5, en estas se observan características del material como zonas elásticas, elástico-plásticas y puntos de falla. Seguidamente, por medio de métodos de regresión polinomial, se ajustaron todos los puntos graficados en una sola curva, obteniendo así la gráfica que mejor describe el comportamiento de la mampostería colonial mixta ante la aplicación de cargas (gráfica 7).



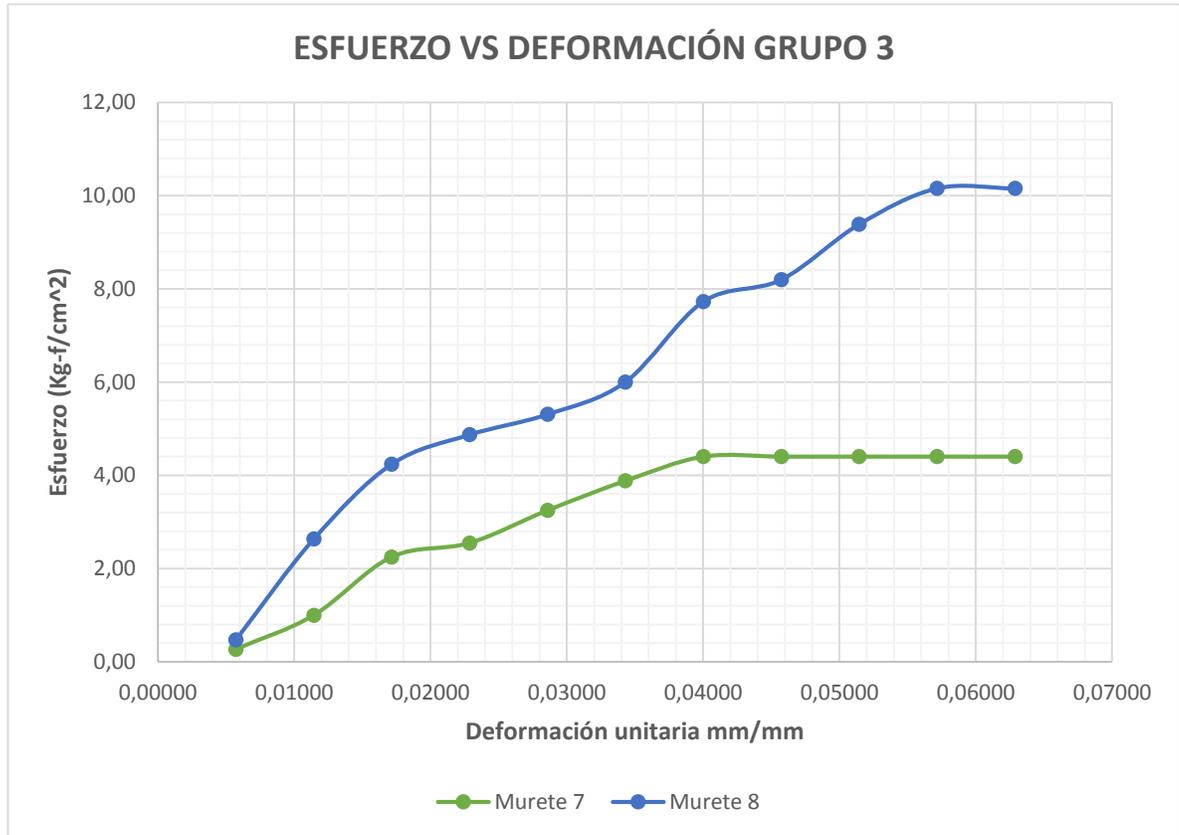
Gráfica 3 – Resultados de deformación por carga axial grupo 1.

Fuente – Autores



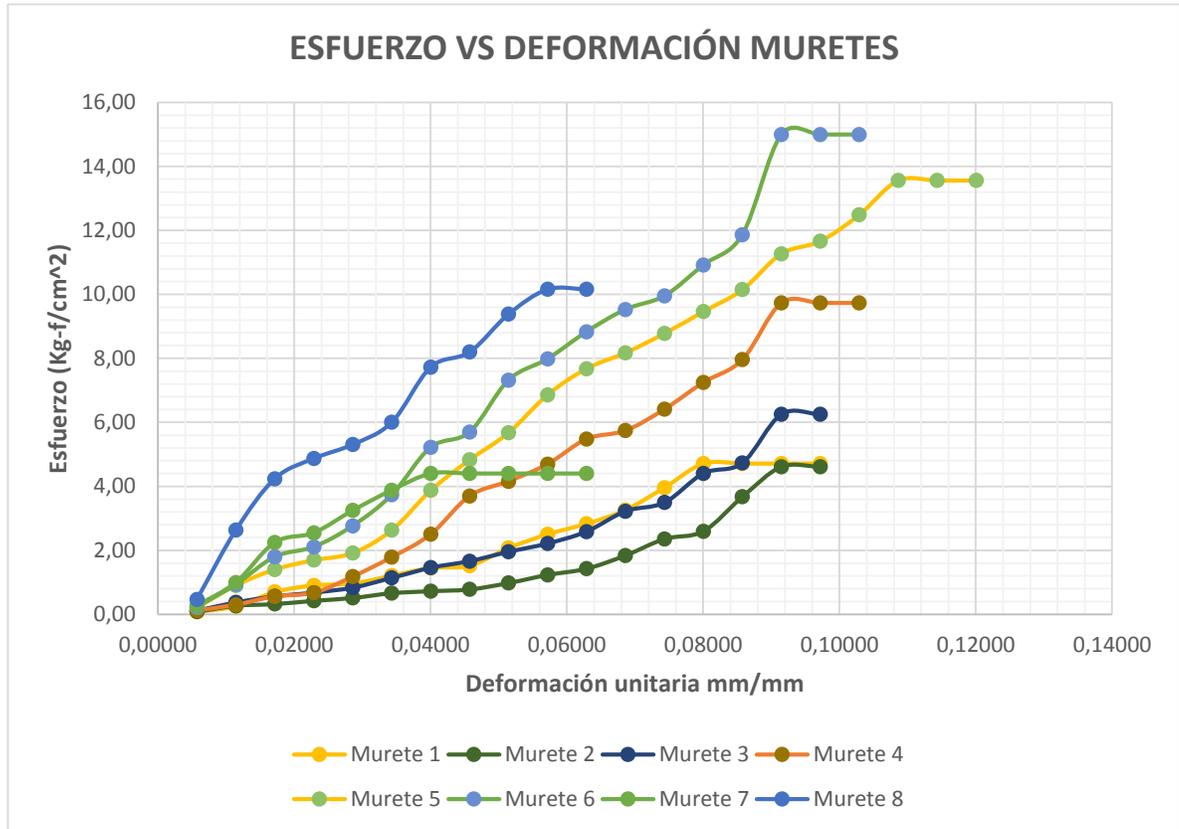
Gráfica 4 - Resultados de deformación por carga axial grupo 2.

Fuente - Autores



Gráfica 5 - Resultados de deformación por carga axial grupo 3.

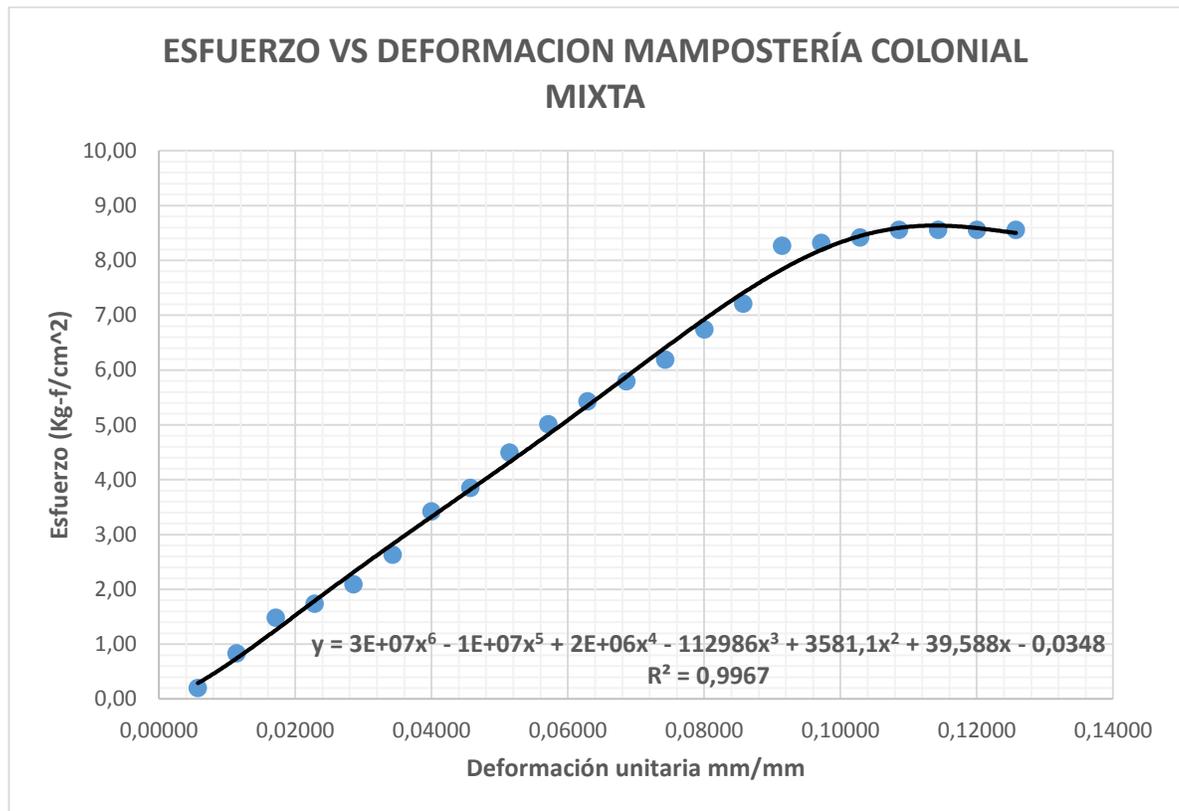
Fuente - Autores



Gráfica 6 - Resultados de deformación a carga axial de todas las muestras.

Fuente – Autores

De la gráfica 6 podemos deducir que a pesar que existe una diferencia entre las magnitudes resultantes, todas las curvas presentan la misma tendencia a excepción de la generada por el murete 8. Como se observa, los muretes extraídos (muestra 7 y 8) fueron los que menos deformaciones presentaron, acto que puede estar ligado a la calidad de los materiales antiguos ya que los muretes con materiales rescatados (muestras 4, 5 y 6) soportaron mayores esfuerzos que los muretes realizados con los materiales nuevos (muestras 1, 2 y 3) con respecto a cada deformación.



Gráfica 7 - Diagrama de esfuerzo contra deformación de la mampostería colonial mixta..

Fuente - Autores

En la gráfica 7 se observa una zona elástica muy marcada de la cual resulta un módulo de elasticidad de 88,65 Kg-f/cm² calculado a partir de la pendiente en esta zona. En contraste, se calculó este mismo modulo por medio de la ecuación que establece el capítulo D.5.2.1.2. en la NSR-10, método por el cual se obtuvo un valor de 6.449,39 Kg-f/cm². La gran diferencia entre las cantidades anteriores evidencia que los planteamientos de la NSR-10 para el cálculo de la resistencia a la compresión y otros parámetros, no aplican en mamposterías de tipo colonial.

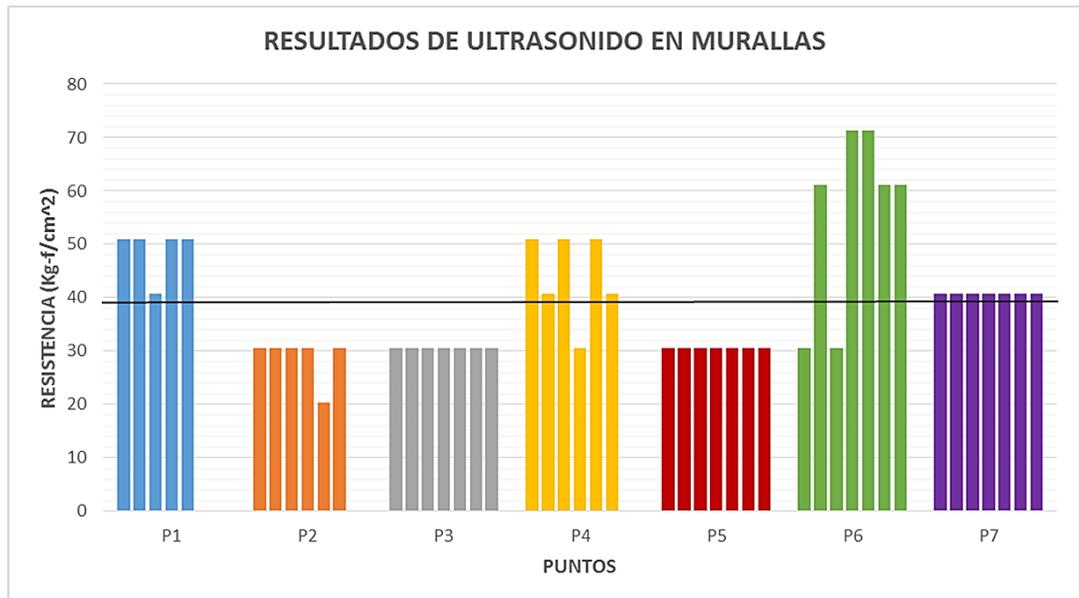
6.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE ULTRASONIDO EN LA MURALLA

Los ensayos de ultrasonido realizados en siete puntos distintos de la contraescarpa de la muralla fueron obtenidos luego de efectuar la media aritmética entre el total de mediciones por cada punto. Lo anterior se ve reflejado en la tabla 5.

RESULTADOS	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	PROMEDIO POR PUNTO
PUNTOS	Kg-f/cm²							
P1	50,95	50,95	40,76	50,95	50,95	-	-	48,91
P2	30,57	30,57	30,57	30,57	20,38	30,57	-	28,87
P3	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57
P4	50,95	40,76	50,95	30,57	50,95	40,76	-	44,16
P5	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57	30,57
P6	30,57	61,14	30,57	71,33	71,33	61,14	61,14	55,32
P7	40,76	40,76	40,76	40,76	40,76	40,76	40,76	40,76
RESISTENCIA PROMEDIO (Kg-f/cm²)								39,88

Tabla 5 - resultados de ultrasonido en contraescarpa de la muralla.

Fuente – autores



Gráfica 8 – Resultados de ultrasonido en la contraescarpa de la muralla.

Fuente – autores

De lo anterior, se pueden observar los resultados de cada medición de ultrasonido en la contraescarpa de la muralla que arrojan una resistencia final de 39,88 Kg-f/cm², resultado que si se encuentra dentro del rango de valores del estudio de referencia para este tipo de mampostería (ver tabla 6).

Argamasa	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Mezcla de Agregados	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Rm1	49,235	46,727	44,220	41,712	39,205	36,697	34,189	31,682	29,174	26,667
Rm2	51,336	48,718	46,099	43,481	40,863	38,245	35,627	33,009	30,391	27,772
Rm3	53,742	50,997	48,253	45,508	42,763	40,018	37,273	34,529	31,784	29,039
Rm4	56,149	53,277	50,406	47,534	44,663	41,791	38,920	36,048	33,177	30,306
Rm5	46,066	43,725	41,384	39,044	36,703	34,362	32,021	29,680	27,340	24,999
Rm6	40,568	38,517	36,465	34,414	32,362	30,311	28,259	26,208	24,157	22,105
Rm7	35,070	33,308	31,546	29,784	28,022	26,260	24,498	22,736	20,974	19,212
Rm8	51,792	49,150	46,508	43,866	41,224	38,581	35,939	33,297	30,655	28,013
Rm9	54,884	52,079	49,274	46,469	43,664	40,859	38,055	35,250	32,445	29,640
Rm10	57,975	55,008	52,040	49,073	46,105	43,137	40,170	37,202	34,235	31,267

Tabla 6 - Rango de resistencias empíricas en mampostería tipo I

Fuente – (España Moratto, Puello Mendoza, & Almanza Vasquez, 2009)

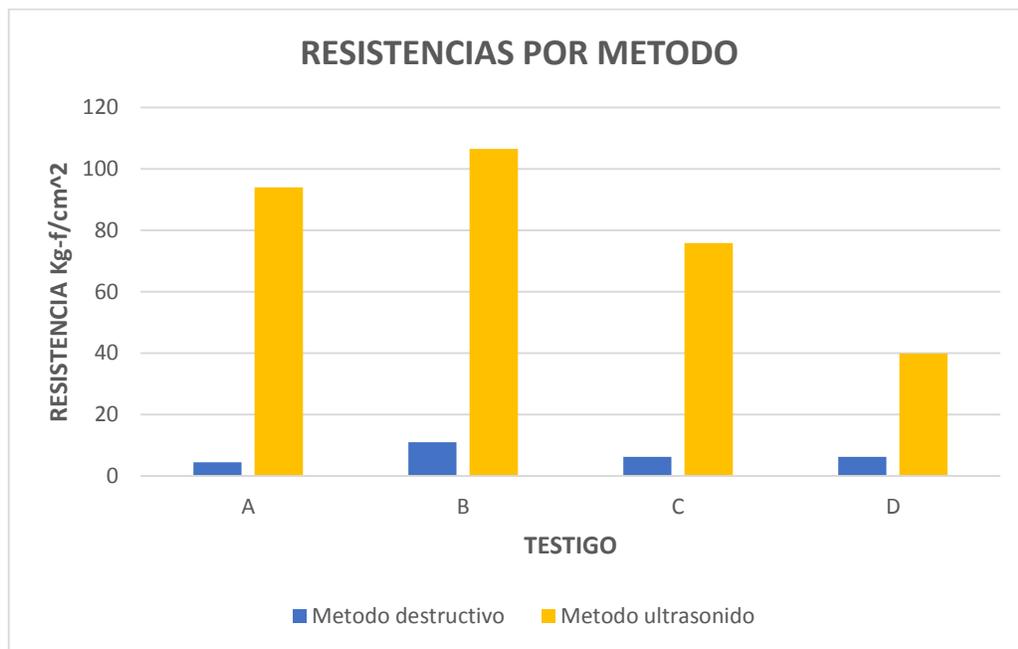
6.4. COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Para el análisis comparativo de resultados se asumió que la resistencia de la mampostería colonial mixta presente en la contraescarpa de la muralla se asemeja en gran medida a la obtenida por métodos destructivos en los ensayos aplicados a las muestras extraídas de una edificación colonial, siendo consecuentes con lo anterior, se presentan los siguientes datos:

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

Tabla 7 - Cuadro comparativo de resultados.

Fuente – Autores



Gráfica 9 – Gráfico comparativo de resultados.

Fuente – autores

El suceso más evidente durante la obtención de los resultados se muestra por si solo en la anterior gráfica; los dos métodos utilizados difieren en gran medida, pues se observa que en todos los casos la resistencia hallada por ultrasonido supera por mucho a la resistencia que en verdad presentaron las muestras, esto debido a que las magnitudes arrojadas por el equipo ultrasónico son las correspondientes a la velocidad de onda que toma esta para atravesar un

material sin importar las diferencias ente sus componentes, es decir, este método no destructivo no tiene en cuenta cual elemento falla primero, asumiendo que el mortero colonial mixto falla en conjunto. Contrario a los resultados de ultrasonido, en las pruebas destructivas se pudo concretar que el componente que determina la falla de este material es la argamasa y que por esta razón se obtuvieron datos tan distantes en la aplicación de ambos métodos, por lo tanto los valores hallados mediante los ensayos no destructivos no son los reales y se pone en duda la pertinencia de ensayos de ultrasonido en este tipo de materiales mixtos.

Aunque el método de ultrasonido no brinde una resistencia parecida a la real, esta si puede dar idea (no muy confiable) de que material presenta una mejor condición, ya que coincide con el método destructivo en que el mortero más resistente fue el elaborado con los agregados rescatados del proceso de extracción de muestras.

6.5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MORTERO COLONIAL MIXTO

Con los resultados expuestos se elaboró una ficha técnica que contiene varios aspectos relacionados con la elaboración de morteros coloniales mixtos en la aplicación a fortificaciones y casas coloniales existentes dentro del centro histórico de la ciudad de Cartagena, estas especificaciones se presentan en la ilustración 30.

FICHA TECNICA MORTERO COLONIAL MIXTO



ASPECTO	GENERALIDADES
	Nombres alternos Mortero tipo cascoteo - Mortero colonial tipo 1
	compresión arproximada 7,23 Kg-f/cm ²
	Modulo de elasticidad arproximado 88,65 Kg-f/cm ²
	Usos pertinentes Mamposteria en fortificaciones y casas coloniales, o como mortero para resanar
COMPONENTES	DETALLES
Retazos de ladrillo militar o tolete	De forma irregular sin tamaño específico
Roca "coral" o caliza	De forma irregular y con el mayor tamaño de los agregados
Roca "pómez" o pumita	De forma irregular y con tamaños parecidos a las rocas calizas
Argamasa	En proporción recomendada de 1:2 de cal hidratada y arena lavada
RECOMENDACIONES	

Este tipo de material no presenta una proporción definida de sus materiales, sin embargo para tener una guía en su preparación se recomienda una relación volumétrica de 1 parte de argamasa, 2 de roca caliza y pómez, y 4 de retazos de ladrillo tolete. El sistema constructivo recomendado es el aparejo o "verdugueo" de materiales mixtos. Lo más importante está en la selección de los materiales. Se debe contar con buen ladrillo, que esté bien cocido y responda muy bien a la carga. Las rocas son otro factor importante y la argamasa es el punto clave para tener el éxito deseado, pues hoy día no contamos con cales tan buenas como en el periodo colonial, cuando se curaba la cal por años. La arena debe estar libre de arcillas. Se recomienda el reciclaje de materiales.

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

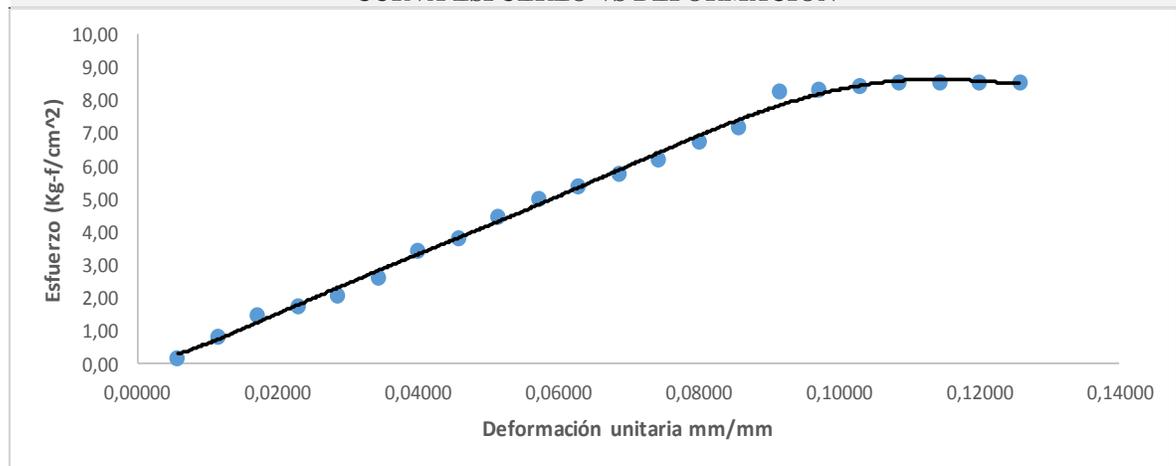


Ilustración 30 – Ficha técnica del mortero colonial mixto. Fuente – Autores

7. CONCLUSIONES

Con base al análisis de los resultados obtenidos luego de seguir la metodología planificada, se infirió lo siguiente:

- De la inspección realizada durante el recorrido por la muralla y durante la extracción de las muestras, se logró reconocer cada uno de los componentes que conforman la mampostería colonial mixta, pero también se observó que no se presentan tamaños nominales o un patrón determinado en la disposición espacial de estos. Por lo tanto se concluye que para la preparación del mortero colonial mixto no existieron ni existen proporciones volumétricas que puedan describir el contenido porcentual de los elementos que conforman este material.
- Las resistencias obtenidas de todos los ensayos destructivos oscilan entre $3,78 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ y $12,89 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, resultados muy bajos en comparación a los esperados con base a investigaciones previas. Al ser la argamasa el elemento que determinó las fallas en todas las muestras, se puede afirmar que este tipo de morteros se debe preparar con la mejor cal que se pueda obtener. Sin embargo, al comparar las resistencias promedio obtenidas de los muretes elaborados con agregados de origen actual ($4,46 \text{ Kg}/\text{cm}^2$), la resultante de los hechos con materiales de origen antiguo ($10,98 \text{ Kg}/\text{cm}^2$) y los originales extraídos ($6,26 \text{ Kg}/\text{cm}^2$), es válido afirmar 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.
- El promedio de todos los resultados de ultrasonido en muretes y contraescarpa fue de $79,05 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, mientras que la media de los obtenidos por pruebas de compresión fue de $7,23 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, es decir que los valores encontrados por el método no destructivo fueron aproximadamente 10 veces mayores a los que realmente presentó la mampostería colonial mixta ensayada.

- Debido a la exagerada diferencia entre los resultados obtenidos por los diferentes métodos y al análisis de falla que se elaboró (en el cual se determinó que la argamasa es quien determina la falla), se concluye que el ensayo de ultrasonido proporciona una resistencia equivalente al tiempo que tarda una onda en atravesar el material sin importar su composición no homogéneo o sin tener en cuenta que elemento falla primero, por lo tanto la prueba de ultrasonido no es un método acertado, recomendado o confiable para la medición de propiedades de un material heterogéneo y sin proporciones de su composición específicas como lo es la mampostería colonial mixta.
- Todos los muretes ensayados cumplieron con los requisitos establecidos para la determinación de la resistencia de la mampostería a la compresión en el título D de la NSR – 10 en cuanto a dimensionamientos, ejecución de ensayos y obtención de resultados se refiere. Sin embargo el cálculo del módulo de elasticidad por medio de la ecuación 6 (según lo expuesto en el capítulo D.5.2.1.2 para mamposterías en arcillas), arroja un resultado de $6449,39 \text{ Kgf/cm}^2$ contra un valor de $88,65 \text{ Kgf/cm}^2$ hallado a partir de la pendiente de la curva definitiva de esfuerzos y deformaciones unitarias. De la comparación se deduce que los planteamientos y recomendaciones de la NSR – 10 para el cálculo de propiedades o parámetros, como el módulo de elasticidad, que se basan en ecuaciones obtenidas de resultados experimentales históricos y estadísticos, no aplican para mamposterías de tipo colonial debido a que estas no se asemejan a las estudiadas por la norma.

8. RECOMENDACIONES

- Debido a los bajos e inesperados resultados obtenidos en los ensayos realizados en esta investigación, se recomienda llevar a cabo estudios similares que busquen la mezcla o proporción de los materiales que mejor resistencia a la compresión presente y así poder estandarizar una proporción óptima para la preparación de estos morteros en intervenciones a bienes patrimoniales, a partir de ensayos experimentales a muretes fabricados con distintos tipos de materiales y con el mayor número de muestras posibles para aumentar la certeza de los resultados.
- Para la preparación del mortero colonial mixto con fines investigativos o de aplicación en el patrimonio, se debe tener en cuenta que este tipo de material no presenta una proporción definida de sus componentes, sin embargo para tener una guía en su preparación se recomienda una relación volumétrica de 1 parte de argamasa, 2 de roca caliza y pómez, y 4 de retazos de ladrillo tolete. El sistema constructivo recomendado es el aparejo o "verdugueo" de materiales mixtos. Lo más importante está en la selección de los materiales; se debe contar con buen ladrillo que esté bien cocido y responda muy bien a la carga. Las rocas son otro factor importante y la argamasa es el punto clave para tener el éxito deseado, pues hoy día no contamos con cales tan buenas como en el periodo colonial, cuando se curaba la cal por años. La arena debe estar libre de arcillas. Se recomienda el reciclaje de materiales.
- Se recomienda el estudio de los otros tipos de mampostería colonial existentes y de otras propiedades mecánicas, físicas o químicas mediante la metodología de recreación o réplica con muretes con el fin de evaluar la calidad en conjunto que producen los materiales disponibles hoy en día para la elaboración de este tipo de morteros y de establecer un banco de resultados que puedan ser utilizados en modelaciones por software o en otras investigaciones en general.
- Para las investigaciones que se deriven de esta, se recomienda evaluar los efectos que producen en los morteros coloniales la adición de cemento gris o blanco a la mezcla



de argamasa en propiedades como la resistencia a compresión y hacer comparaciones con las obtenidas en el presente trabajo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

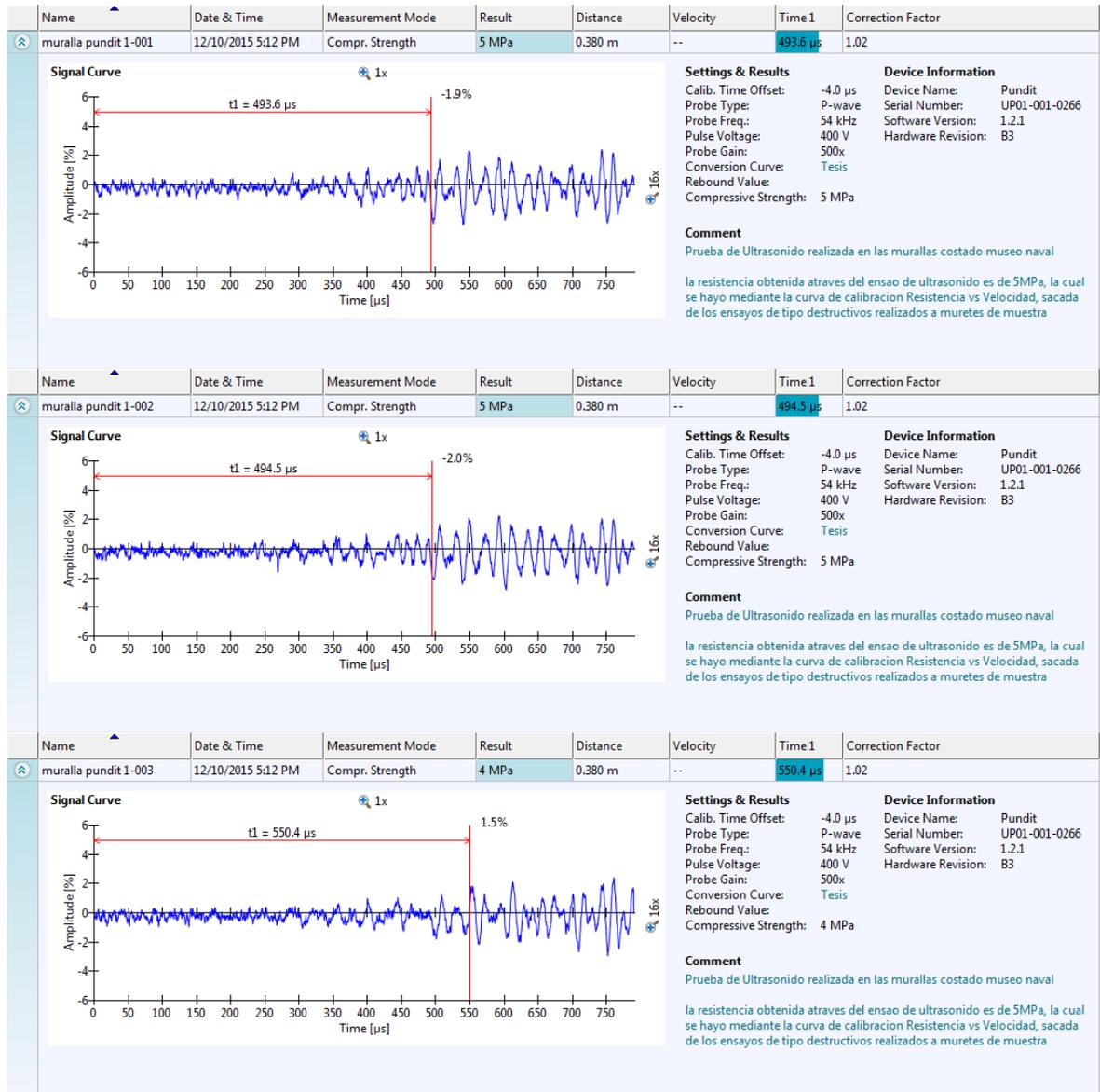
- Acuña Robles, G. (2012). *Diagnosís de los patrones de deterioro en el material pétreo de la muralla influenciado por el ambiente húmedo y salino en la ciudad de Cartagena*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Aguirre Castellar, L., & Arrieta Torres, A. (2014). *Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicano en la ciudad de Cartagena*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Alcaldía de Cartagena. (4 de Marzo de 2015). *Historia de Cartagena*. Obtenido de <http://www.cartagena-indias.com/historia.html>.
- Arcillas de Colombia. (2011). *Historia del Ladrillo*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de <http://www.arcillasdecolombia.com>
- Arteaga Medina, K., Medina, O., & Gutiérrez Junco, O. (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Facultad de Ingeniería UPTC*, 55-68.
- Buendía Atencio, C., & Barbosa López, A. (2006). *Estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena de Indias*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Cabrera Cruz, A. R., Martelo Osorio, R., Martínez Sagrera, A. J., & Martínez Vázquez, R. H. (1991). *Técnicas antiguas de construcción la permanencia de los sistemas*. Cartagena.
- Cartagena, A. d. (12 de 04 de 2015). *Cartagena Caribe*. Obtenido de <http://www.cartagenacaribe.com/historia/historia.htm>
- Cartagena-Caribe. (2013). *Historia Cartagena de Indias*. Recuperado el 12 de Abril de 2015, de <http://www.cartagenacaribe.com/historia/historia.htm>
- Covo Torres, A. I. (2008). *DISEÑOS PARA LA RESTAURACIÓN DEL LIENZO DE MURALLAS ENTRE EL MONUMENTO DE LA INDIA CATALINA Y EL MUSEO DE LA MARINA, CARTAGENA DE INDIAS, BOLÍVAR*. Cartagena.
- Crespo Escobar, S. (2009). *Materiales de Construcción para edificación y obra civil* (Original ed., Vol. I). Alicante, España. Recuperado el 12 de Febrero de 2015
- Cuevas Mercado, A., & Herrera Corrales, C. (2013). *Propiedades mecánicas de la mampostería colonial de edificaciones en la ciudad de Cartagena de Indias*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- España Moratto, J., & Tapia De Oro, M. (2008). Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipología colonial.

- España Moratto, J., Puello Mendoza, E., & Almanza Vázquez, E. (2009). Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias. *Educacion en Ingenieria*, 142-154.
- España Moratto, J., Puello Mendoza, E., & Almanza Vasquez, E. (2009). Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias. *Revista Educación en Ingeniería, ISSN 1900-8260*.
- Evelio, J., & Flores Valdes, E. (2004). Estudio de los efectos de la disolución kárstica y la erosión, en las obras patrimoniales de la "Villa de San Cristóbal de la Habana. La Habana, Cuba.
- Falcon Rodriguez, L. (2010). *Propuesta de intervención de las edificaciones patrimoniales de la ciudad de Matanzas en Cuba*. Obtenido de http://universidadpatrimonio.net/doc/doc/2_1_10.pdf, 2010
- Fernandez Torres, G., & Palencia Cantillo, S. (2014). *Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de tierra bomba para comprobar su uso en la construccion de las murallas de Cartagena de Indias y compararlo con el utilizad en su restauración*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Flores, V., Arroyo, R., & Barragan, R. (2013). Propiedades Mecanicas de la Mamposteria de Tabique Rojo recocido utilizada en Chilpancingo. *Informes de La Construcción*, 65,531, 387-395.
- Google. (s.f.). *Google maps*. Obtenido de https://www.google.es/maps/place/Cartagena,+Bol%C3%ADvar,+Colombia/@10.425132,-75.553283,3a,75y,303.49h,91.08t/data=!3m4!1e1!3m2!1s_SIWq1vYk1n1cUtpQNGAig!2e0!4m2!3m1!1s0x8ef625e7ae9d1351:0xb161392e033f26ca
- GuiaTodo Colombia. (14 de Diciembre de 2013). *GuiaTodo*. Recuperado el 20 de Abril de 2015, de http://www.guiatodo.com.co/Sitio/cartagena/la_muralla_de_cartagena
- Herrera Díaz, A. (2009). *Estudios y sideños tecnicos para la restauración del lienzo de murallas entre el Monumento de La India Catalina y el Museo de la Marina*. Cartagena de Indias.
- IPCE. (s.f.). *Instituto del Patrimonio Cultural de España*. Obtenido de http://ipce.mcu.es/gabineteprensa/mostrarDetalleGabinetePrensaAction.do;jsessionid=16A5E316B33244D2994172351841DE3F?prev_layout=ipceNotasPrensa&layout=ipceNotasPrensa&html=31862012nota.txt&language=es&cache=init
- Jimenez, J. (s.f.). Obtenido de I.E.S. SIERRA MÁGINA: http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~23005153/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/Tema1-Tipos%20de%20ensayos.pdf
- Kanan, M. (2006). Argamasas de cal en la restauración de fortificaiones. *APUNTES VOL 19*, 8-21.
- Llopis, V. P. (s.f.). *Ensayos no destructivos en Hormigon. Georadar y Ultrasonidos*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

- López, S., Quiroga, P., & Torres, N. (2012). Evaluación del comportamiento de muros de mampostería no reforzada recubierta con morteros reforzados. *XXXV Jornada sur americana de Ingeniería Estructural*.
- Martínez Vásquez, R. H., & Cabrera Cruz, A. (s.f.). TÉCNICAS ANCESTRALES DE CONSTRUCCIÓN EN EL MUDEJAR CARTAGENERO. (pág. 14). Cartagena: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Meza, M., & Cohen, J. (2011). *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales en el departamento de Bolívar para restaurar las Murallas*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Meza Flórez, M., & Cohen Rhenals, J. (2011). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales más utilizados y disponibles en la región para la restauración de las fortificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Ministerio de Cultura. (2007). *Manual de uso temporal y aprovechamiento económico de las Murallas de Cartagena*. Bogota D.C: MinCultura. Recuperado el 21 de Abril de 2015, de <http://www.fortificacionesdecartagena.com/es/manual-uso-murallas.pdf>
- Ortiz Quintana, S. (2005). Metodos numéricos aplicados a la ingeniería. *Ciencia & Desarrollo*, 79-82.
- Otero, A. V. (s.f.). *Ciencia y Tecnología de los Materiales*. Ávila, España: Escuela Politécnica Superior de Ávila.
- Puertos de Cartagena, Santa Marta y Providencia. (27 de Diciembre de 2014). *Ministerio de Comercio, Industria y Turismo*. Obtenido de <http://www.mincit.gov.co/publicaciones.php?id=16590>
- Región Murcia digital. (Accesado[27 de Febrero de 2015]). *La Caliza*. Artículo de internet.
- Revista SEMANA. (23 de Marzo de 2012). *Semana.com*. Obtenido de <http://www.semana.com/especiales/patrimonios-colombia-humanidad/cartagena-de-indias.html>
- Rhenals Acuña, L., & Santos De Ávila, L. (2012). *Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas de cartagena y el utilizado para su restauración y rehabilitación*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Rocha, J. (2003). *Estudio de patologías y capacidad de cargas de Cordón amurallado de Cartagena de Indias*. Cartagena.
- RODOLFO, S. (12 de 04 de 2015). Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad. Colombia. Obtenido de Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/noviembre2001/cartagena.htm>

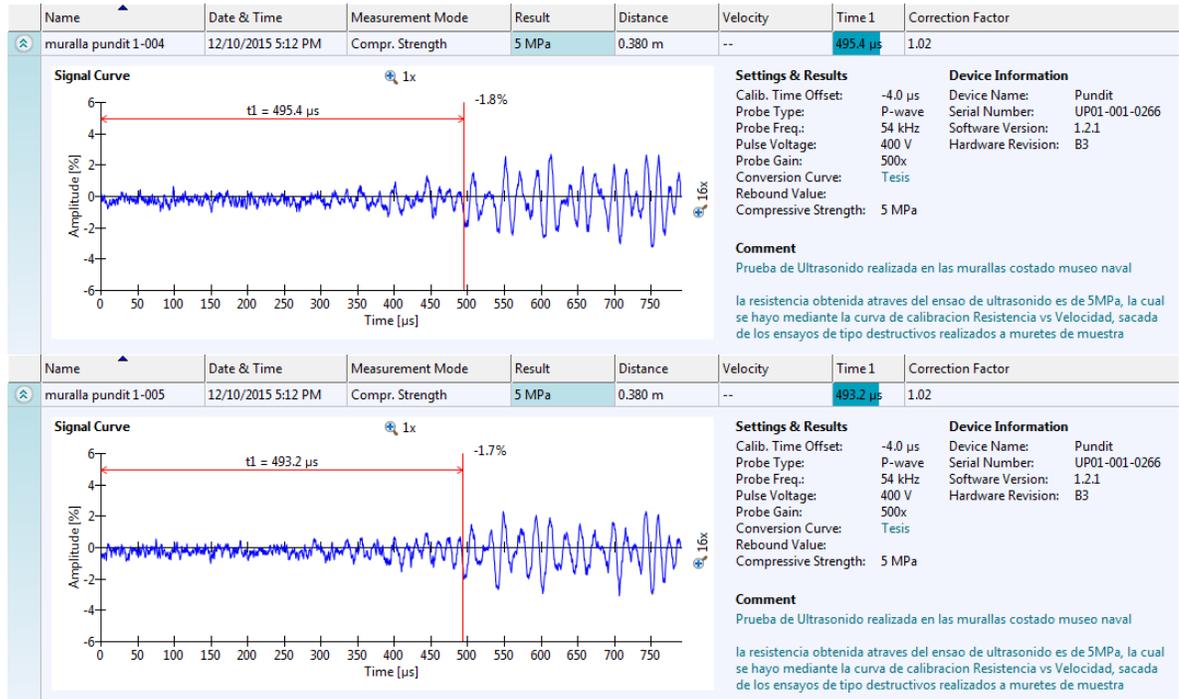
- Tena Colunga, A., Juárez Ángeles, A., & Salinas Vallejo, V. (2007). Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales. *Ingeniería Sísmica*, 29-60.
- Teran, J. (2004). Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. *Conserva*.
- Timoshenko, S., & Gere, J. (1986). *Mecanica de materiales 2da edicion*. Mexico: Grupo Editorial Iberoamericana.
- Torok, A., & Priktyl, R. (2010). *Current Methods And Future Trends In Testing, Durability Analyses and Provenace Studies Of Natural Stones Used In Historical Monuments*. Budapest: University of technology.
- Trallero, A. S. (1 de 10 de 2015). Procesos constructivos en manposteria colonial. (J. C. Gamarra Torres, & A. F. Camargo Bocanegra, Entrevistadores)
- Turismo en fotos*. (s.f.). Obtenido de www.turismoenfotos.com:
<http://www.turismoenfotos.com/7616:murallas-de-la-ciudad?dim=2>
- Universidad Nacional de Colombia. (15 de abril de 2006). Determinación del tamaño de muestras. Manizales, Colombia.

10. ANEXOS

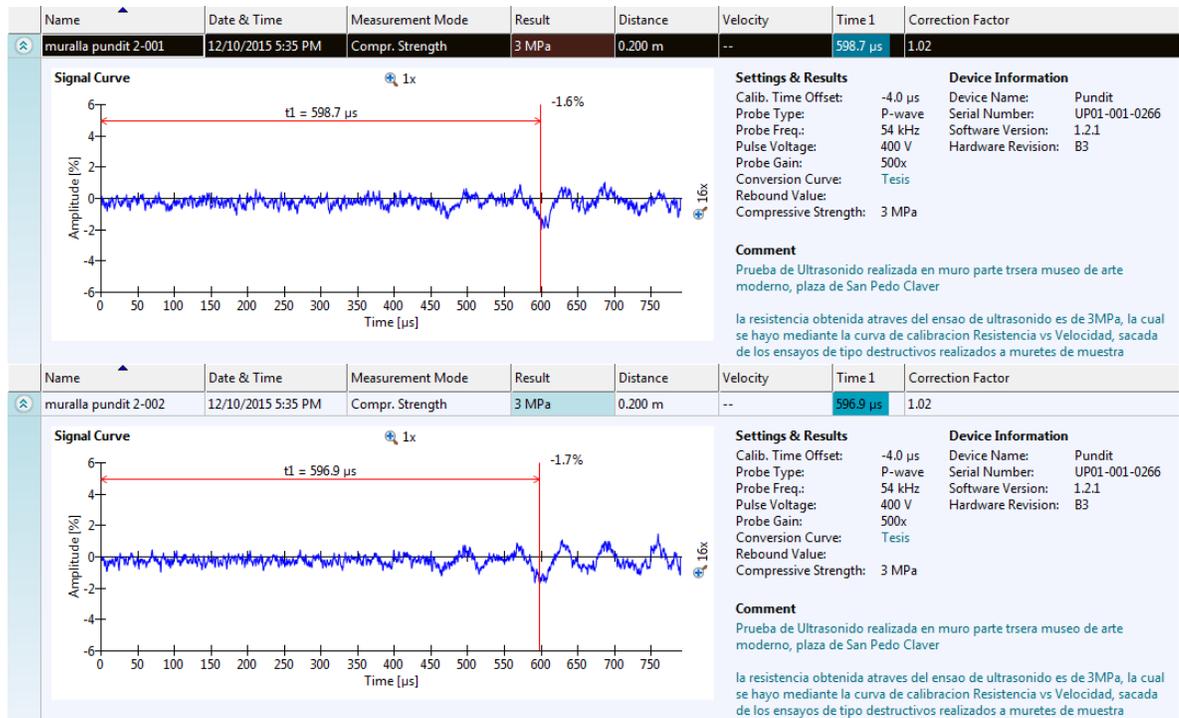


Anexo 1 – Toma 1, resultados 1,2 y 3.

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

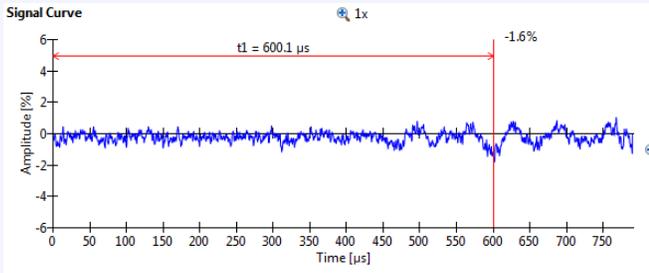
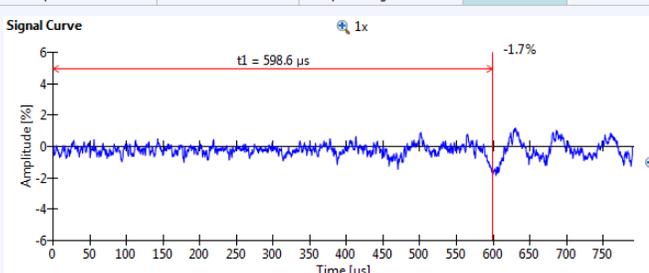
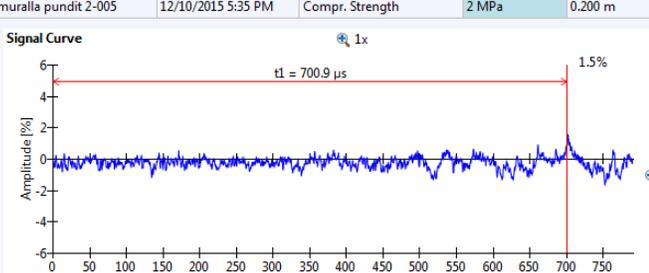
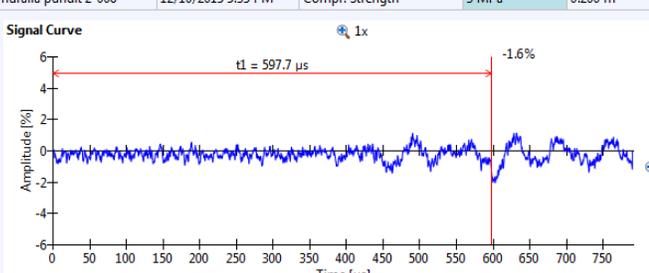


Anexo 2 - Toma 1, resultados 4 y 5.



Anexo 3 - Toma 2, resultados 1 y 2

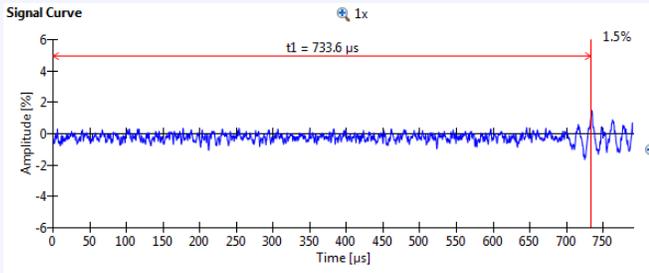
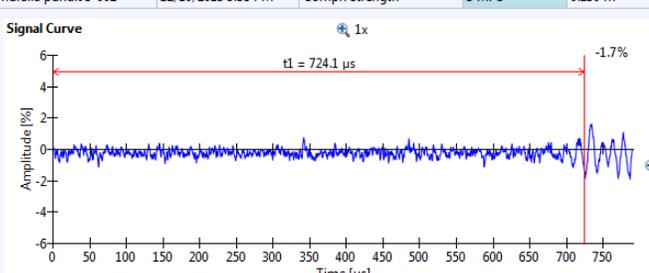
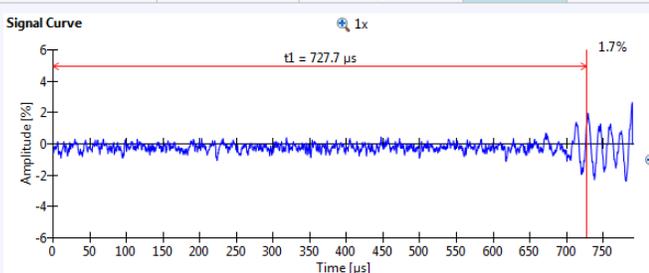
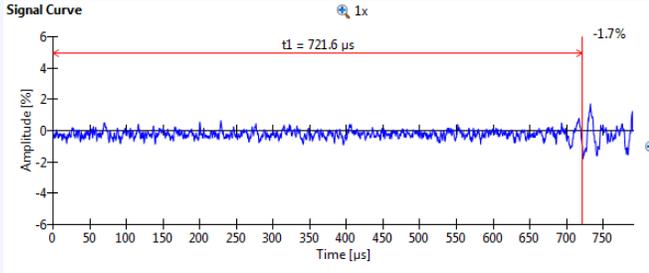
COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN ENTRE MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA PRESENTE EN EDIFICACIONES Y FORTIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE CARTAGENA DE INDIAS, Y MURETES FABRICADOS BAJO CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN SEMEJANTES

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 2-003	12/10/2015 5:35 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.200 m	--	600.1 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 2-004	12/10/2015 5:35 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.200 m	--	598.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 2-005	12/10/2015 5:35 PM	Compr. Strength	2 MPa	0.200 m	--	700.9 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 2 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 2-006	12/10/2015 5:35 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.200 m	--	597.7 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

Anexo 4 - Toma 2, resultados 3, 4, 5 y 6.

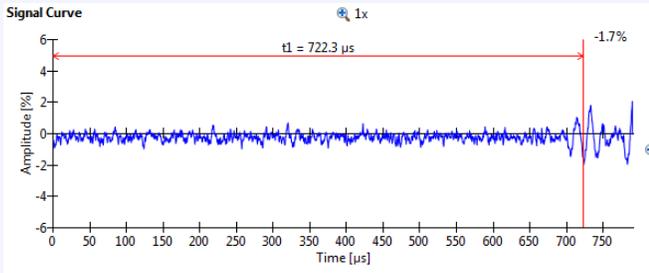
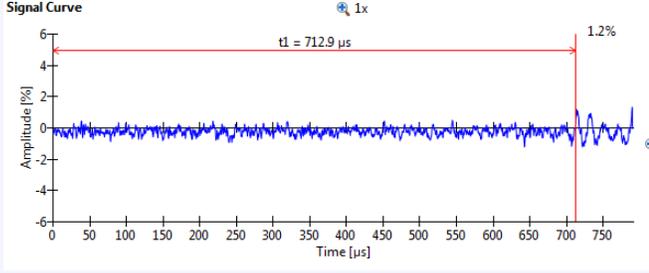
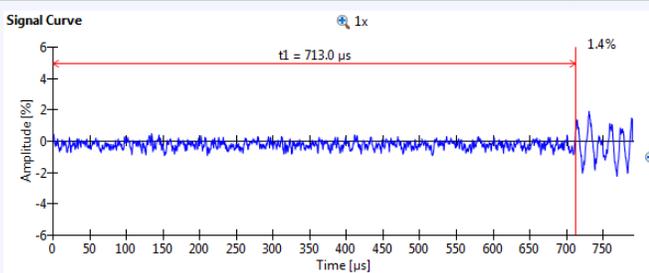
COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN ENTRE MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA PRESENTE EN EDIFICACIONES Y FORTIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE CARTAGENA DE INDIAS, Y MURETES FABRICADOS BAJO CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN SEMEJANTES



Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 3-001	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	733.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 3-002	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	724.1 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 3-003	12/10/2015 5:37 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	727.7 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 3-004	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	721.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

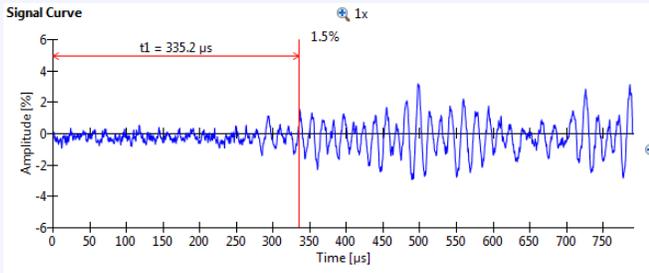
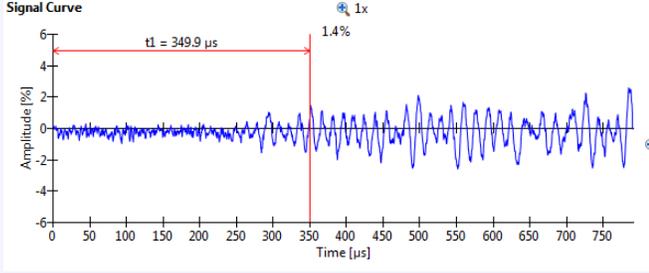
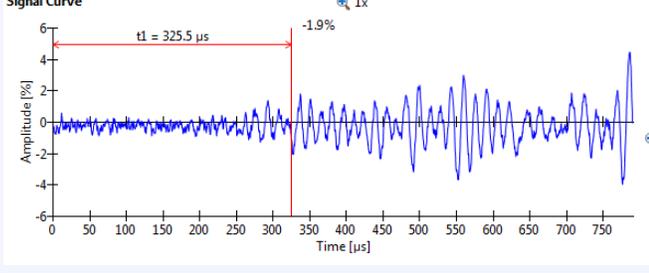
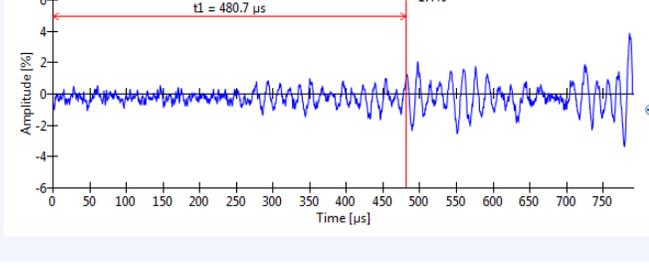
Anexo 5 - Toma 3, resultados 1,2, 3 y 4.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 3-005	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	722.3 μ s	1.02
<p>Signal Curve</p>  <p>Settings & Results</p> <ul style="list-style-type: none"> Calib. Time Offset: -4.0 μs Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa <p>Device Information</p> <ul style="list-style-type: none"> Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3 <p>Comment</p> <p>Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver</p> <p>la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra</p>							
muralla pundit 3-006	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	712.9 μ s	1.02
<p>Signal Curve</p>  <p>Settings & Results</p> <ul style="list-style-type: none"> Calib. Time Offset: -4.0 μs Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa <p>Device Information</p> <ul style="list-style-type: none"> Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3 <p>Comment</p> <p>Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver</p> <p>la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra</p>							
muralla pundit 3-007	12/10/2015 5:38 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	713.0 μ s	1.02
<p>Signal Curve</p>  <p>Settings & Results</p> <ul style="list-style-type: none"> Calib. Time Offset: -4.0 μs Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa <p>Device Information</p> <ul style="list-style-type: none"> Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3 <p>Comment</p> <p>Prueba de Ultrasonido realizada en muro parte trsera museo de arte moderno, plaza de San Pedro Claver</p> <p>la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra</p>							

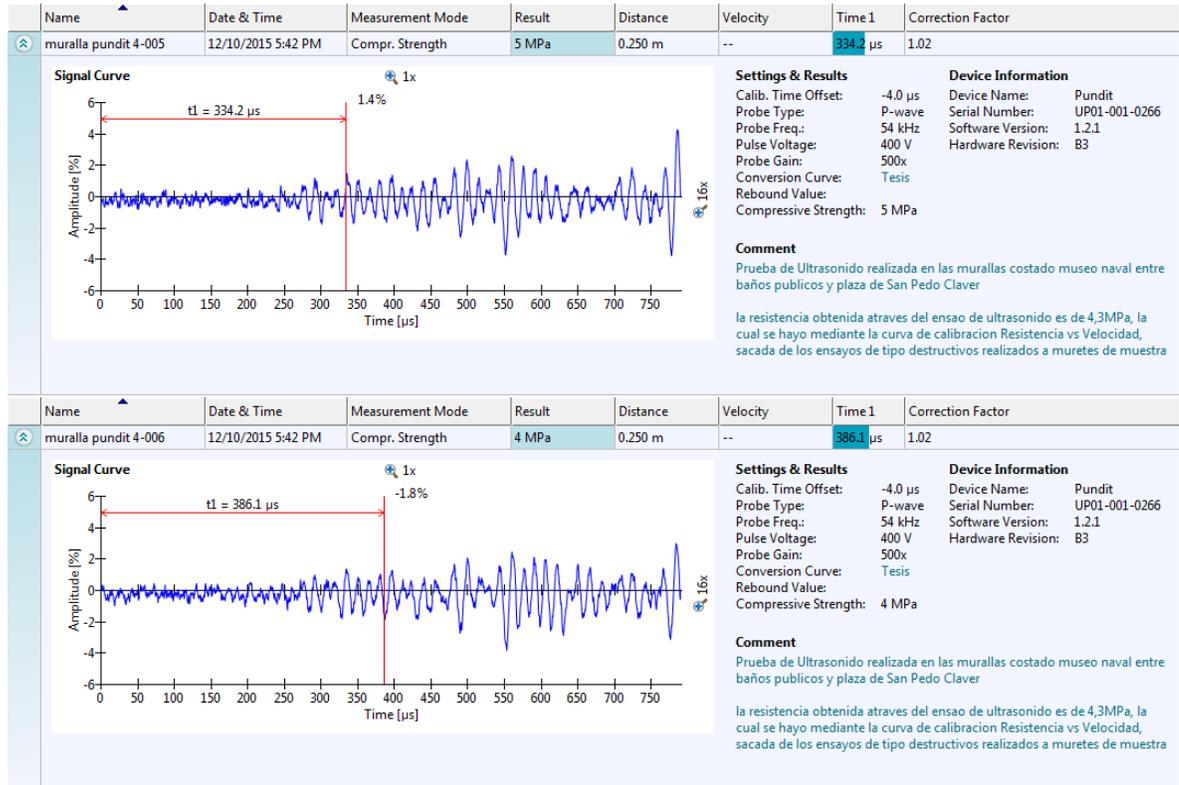
Anexo 6 - Toma 3, resultados 5, 6, y 7.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 4-001	12/10/2015 5:42 PM	Compr. Strength	5 MPa	0.250 m	--	335.2 μ s	1.02
		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 5 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas costado museo naval entre baños publicos y plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 4,3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 4-002	12/10/2015 5:42 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.250 m	--	349.9 μ s	1.02
		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas costado museo naval entre baños publicos y plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 4,3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 4-003	12/10/2015 5:42 PM	Compr. Strength	5 MPa	0.250 m	--	325.5 μ s	1.02
		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 5 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas costado museo naval entre baños publicos y plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 4,3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 4-004	12/10/2015 5:42 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	480.7 μ s	1.02
		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas costado museo naval entre baños publicos y plaza de San Pedro Claver la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 4,3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

Anexo 7 - Toma 4, resultados 1,2, 3 y 4.

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



Anexo 8 - Toma 4, resultados 5 y 6.

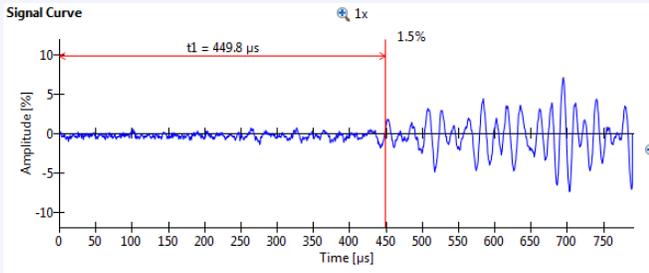
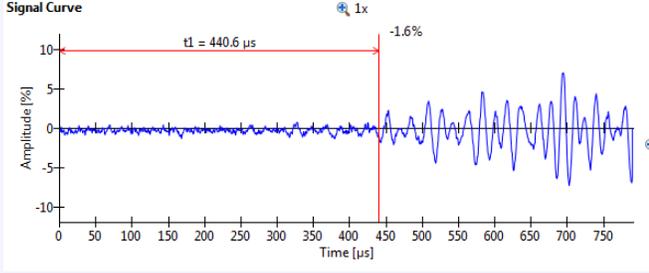
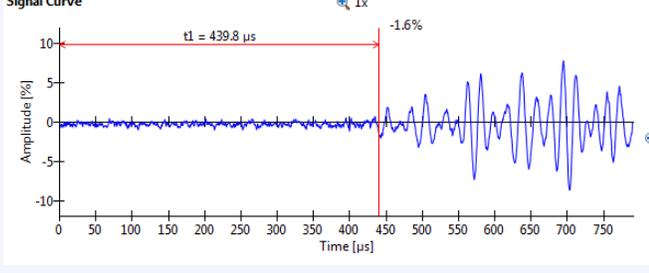
COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN ENTRE MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA PRESENTE EN EDIFICACIONES Y FORTIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE CARTAGENA DE INDIAS, Y MURETES FABRICADOS BAJO CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN SEMEJANTES



Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 5-001	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	449.7 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 5-002	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	449.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 5-003	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	448.8 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 5-004	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	448.9 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensao de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

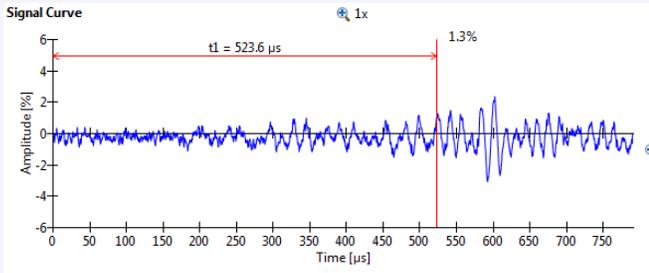
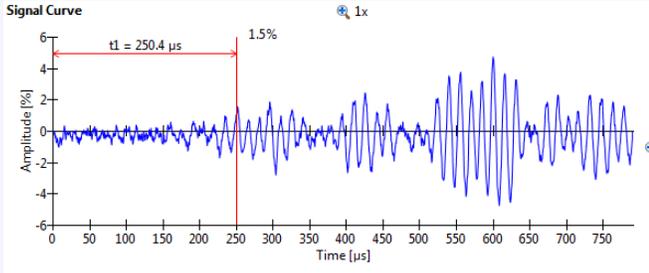
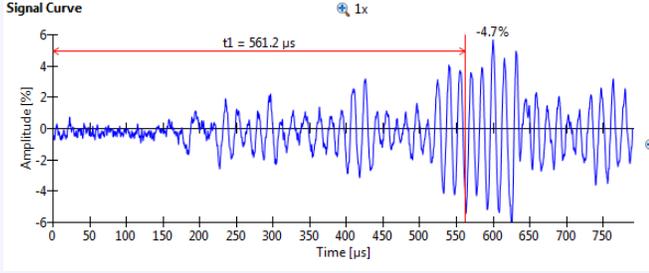
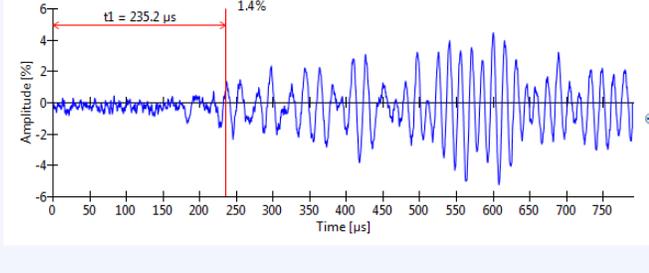
Anexo 9 - Toma 5, resultados 1,2, 3 y 4.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 5-005	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	449.8 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 5-006	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	440.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 5-007	12/10/2015 5:50 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.150 m	--	439.8 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en muro vivienda ubicada entre hotel santa teresa y el baluarte san cristobal la resistencia obtenida a través del ensayo de ultrasonido es de 3MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

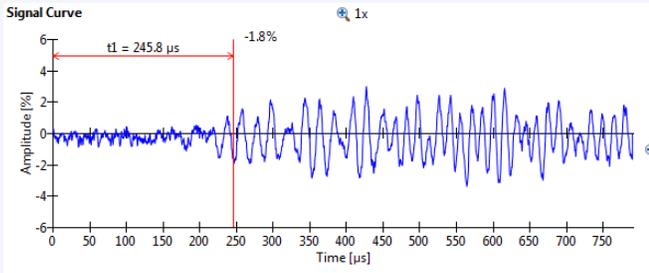
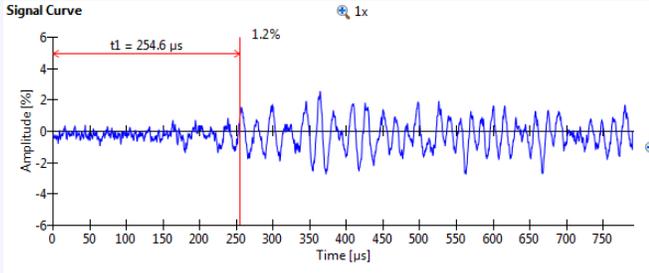
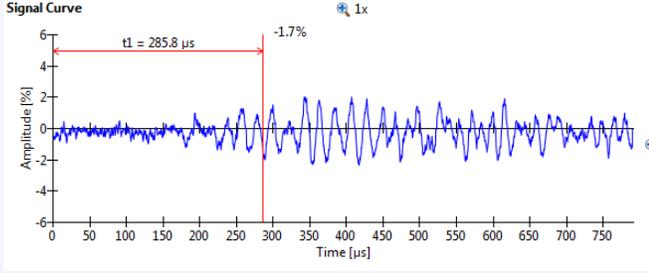
Anexo 10 - Toma 5, resultados 5, 6 y 7.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 6-001	12/10/2015 5:53 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	523.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 6-002	12/10/2015 5:53 PM	Compr. Strength	6 MPa	0.250 m	--	250.4 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 6 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 6-003	12/10/2015 5:53 PM	Compr. Strength	3 MPa	0.250 m	--	561.2 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 3 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 6-004	12/10/2015 5:54 PM	Compr. Strength	7 MPa	0.250 m	--	235.2 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 7 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

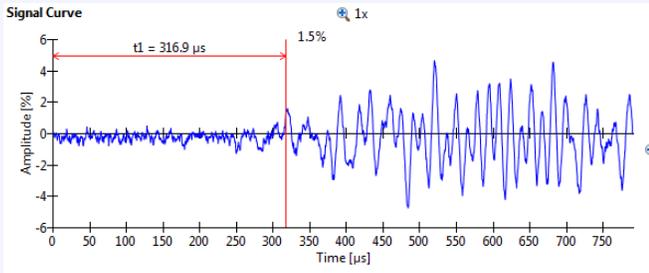
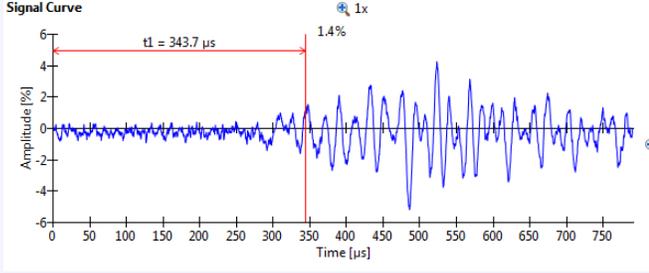
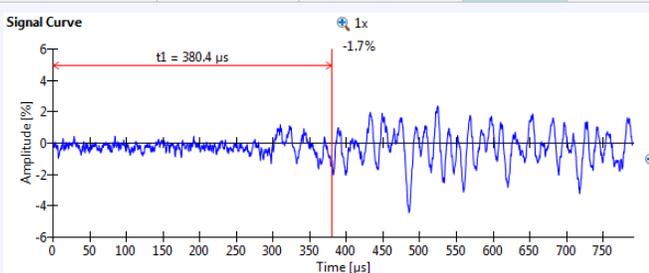
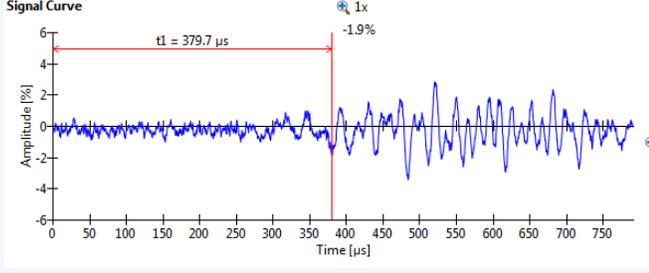
Anexo 11 - Toma 6, resultados 1,2, 3 y 4.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 6-005	12/10/2015 5:54 PM	Compr. Strength	7 MPa	0.250 m	--	245.8 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 7 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 6-006	12/10/2015 5:54 PM	Compr. Strength	6 MPa	0.250 m	--	254.6 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 6 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 6-007	12/10/2015 5:54 PM	Compr. Strength	6 MPa	0.250 m	--	285.8 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 6 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 5MPa a 6MPa , la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

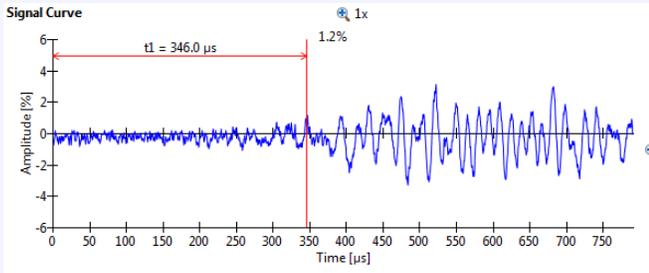
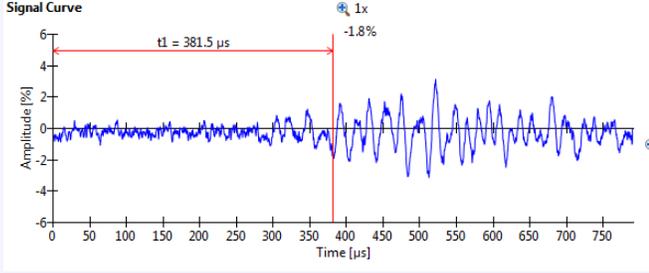
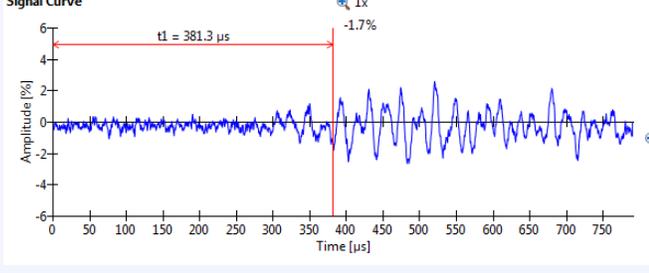
Anexo 12 - Toma 6, resultados 5, 6 y 7.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 7-001	12/10/2015 5:58 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	316.9 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 7-002	12/10/2015 5:58 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	343.7 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 7-003	12/10/2015 5:58 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	380.4 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 7-004	12/10/2015 5:59 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	379.7 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

Anexo 13 - Toma 7, resultados 1,2, 3 y 4.

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

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
muralla pundit 7-005	12/10/2015 5:59 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	346.0 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 7-006	12/10/2015 5:59 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	381.5 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							
muralla pundit 7-007	12/10/2015 5:59 PM	Compr. Strength	4 MPa	0.210 m	--	381.3 μ s	1.02
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -4.0 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 400 V Probe Gain: 500x Conversion Curve: Tesis Rebound Value: Compressive Strength: 4 MPa		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-001-0266 Software Version: 1.2.1 Hardware Revision: B3			
Comment Prueba de Ultrasonido realizada en las murallas de cartagena a la altura del baluarte san cristobal la resistencia obtenida a traves del ensao de ultrasonido es de 4MPa, la cual se hayo mediante la curva de calibracion Resistencia vs Velocidad, sacada de los ensayos de tipo destructivos realizados a muretes de muestra							

Anexo 14 - Toma 7, resultados 5, 6 y 7.