

**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**



Trabajo de Grado para Optar al Título de:

INGENIERO CIVIL

LUIS FELIPE AGUIRRE CASTELLAR

ALFREDO ANDRÉS ARRIETA TORRES

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA D. T. Y C. – BOLIVAR

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**

Línea De Investigación:

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Grupo De Investigación:

CIENCIA Y SOCIEDAD

Coinvestigadores:

LUIS FELIPE AGUIRRE CASTELLAR

ALFREDO ANDRÉS ARRIETA TORRES

Investigador y Director:

MSC. JORGE ALVAREZ CARRASCAL

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA D. T. Y C. – BOLIVAR

2014



NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado



AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres y familiares por el apoyo fiel e incondicional durante todos estos años de esfuerzo y dedicación.

A Dios por todas las bendiciones derramadas y por brindarnos la fortaleza necesaria para superar todos los obstáculos y dificultades en nuestro proceso de formación.

A nuestro director de tesis Ing. Jorge Álvarez Carrascal, por su ayuda constante y sus oportunas recomendaciones para el desarrollo del proceso investigativo del presente trabajo de grado.

A los docentes Ing. Modesto Barrios, Ing. William Villa, Arq. Alfonso Cabrera por sus valiosos aportes a esta investigación.

A los arquitectos Álvaro Barrera, Alberto Samudio y Rosa Martínez.

A nuestros amigos y compañeros de estudio por tantos momentos compartidos.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO REFERENCIAL	17
1.1. ANTECEDENTES	17
1.2. ESTADO DEL ARTE	21
1.2.1. Caracterización y estudio de las propiedades de bloques de arcilla y morteros para mampostería.	22
1.2.2. Estudio de propiedades y características de la madera en construcciones antiguas. 27	
1.3. MARCO TEORICO	31
1.3.1. Materiales de construcción a estudiar	31
1.3.2. Propiedades físicas y mecánicas a analizar	32
1.3.3. Normas de referencia para ensayos de laboratorio para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas	40
1.3.4. Ensayos no destructivos (END)	41
2. OBJETIVOS	44
2.1. OBJETIVO GENERAL	44
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	44
3. ALCANCE	45
3.1. Delimitación espacial	45
3.2. Delimitación temporal	47
3.3. Producto final a entregar y productos complementarios	47
3.4. Aspectos que no incluye la investigación	48
4. METODOLOGIA	49
4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE	49
4.2. LUGAR Y MATERIALES DE ESTUDIO	50
4.2.1. Identificación de los Lugares de Estudio.	50
4.2.2. Identificación de los Lugares donde se adquieren los Materiales actuales de Restauración.	51
4.2.3. Recolección de los Materiales de Estudio.	51



4.3.	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS PERTINENTES	51
4.3.1.	Ensayos No Destructivos	51
4.3.2.	Ensayos Destructivos	52
4.4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	54
4.5.	PREPARACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL INFORME FINAL.....	54
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5.1.	ENSAYOS CON LADRILLOS	55
5.1.1.	Resistencia a la compresión por esclerómetro o martillo de Schmidt	55
5.1.2.	Ensayo de Resistencia a la Compresión con la Maquina Universal	57
5.1.3.	Ensayo para determinar Gravedad Específica Bulk y Absorción.....	62
5.1.4.	Ensayo de Permeabilidad	64
5.1.5.	Ensayo de desgaste por medio de la Máquina de Los Ángeles.....	69
5.2.	ENSAYOS CON MADERAS.....	72
5.2.1.	Densidad o peso específico aparente.....	72
5.2.2.	Ensayo de resistencia a la flexión.....	75
5.2.3.	Ensayo de resistencia al corte o cizallamiento (paralelo al grano)	78
5.3.	ENSAYOS CON MORTEROS.....	81
5.3.1.	Resistencia a la compresión por esclerómetro o martillo de Schmidt	81
5.3.2.	Ensayo de Resistencia a la Compresión con la Maquina Universal	83
6.	CONCLUSIONES.....	89
7.	RECOMENDACIONES.....	92
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número Total de Muestras de cada material de ensayos No Destructivos.	52
Tabla 2. Número Total de Muestras de Ladrillo de Arcilla.	53
Tabla 3. Número Total de Muestras de la Madera.	53
Tabla 4. Número Total de Muestras de Mortero.	53
Tabla 5. Lecturas de rebotes registradas en el esclerómetro, según cada punto ensayado.	55
Tabla 6. Resistencia a la compresión obtenida para el ladrillo antiguo presente en Obra Pía.	56
Tabla 7. Resistencia a la compresión del ladrillo antiguo presente en Obra Pía.	58
Tabla 8. Resistencia a la compresión del ladrillo Nuevo de la Ferretería Antioquia.	59
Tabla 9. Resistencia a la compresión del ladrillo Nuevo de la Ladrillera Bayunca.	60
Tabla 10. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Obra Pía.	62
Tabla 11. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Ferretería Antioquia.	63
Tabla 12. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Ladrillera Bayunca.	63
Tabla 13. Permeabilidad de Ladrillos de Obra Pía.	65
Tabla 14. Permeabilidad de Ladrillos de la Ferretería Antioquia.	66
Tabla 15. Permeabilidad de Ladrillos de la Ladrillera Bayunca.	67
Tabla 16. Condiciones de realización del ensayo de desgaste.	69
Tabla 17. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos antiguos (Obra Pía).	69
Tabla 18. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos nuevos (Ladrillera Bayunca).	69
Tabla 19. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos nuevos (Ferretería Antioquia).	70
Tabla 20. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera antiguas (Obra Pía).	72
Tabla 21. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).	73
Tabla 22. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).	73
Tabla 23. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera antiguas (Obra Pía).	76



Tabla 24. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).....	76
Tabla 25. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).....	76
Tabla 26. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera antiguas (Obra Pía).	78
Tabla 27. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).....	79
Tabla 28. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).....	79
Tabla 29. Lecturas de rebotes registradas en el esclerómetro, según cada punto ensayado.....	81
Tabla 30. Resistencia a la compresión obtenida para el mortero antiguo presente en Obra Pía.	82
Tabla 31. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 7 días.	83
Tabla 32. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 14 días.	84
Tabla 33. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 28 días.	84
Tabla 34. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 7 días.	84
Tabla 35. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 14 días.	85
Tabla 36. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 28 días.	85



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distintos tipos de volúmenes para determinar las densidades.....	33
Figura 2. Ubicación de la edificación de tipo colonial que fue objeto de estudio.	46
Figura 3. Realización de pruebas de esclerómetro en Obra Pía.....	57
Figura 4. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Ladrillo	62
Figura 5. Ensayo de Permeabilidad del Ladrillo.....	68
Figura 6. Colocación de la muestra de ladrillo a ensayar dentro de la Máquina de los Ángeles.....	71
Figura 7. Probetas para el ensayo de Peso Específico Aparente en maderas, obtenidas por medio de Yadira Paternina.....	74
Figura 8. Muestras de Mortero recién preparadas.....	88
Figura 9. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Mortero	88



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Lecturas de rebotes obtenidas mediante el uso del esclerómetro.....	56
Gráfico 2. Resultados obtenidos de Obra Pía.....	58
Gráfico 3. Resultados obtenidos de Ferretería Antioquia.	59
Gráfico 4. Resultados obtenidos de Ladrillera Bayunca.	60
Gráfico 5. Resultados obtenidos del promedio de cada Lugar de Estudio.....	61
Gráfico 6. Valores promedio de desgaste para cada tipo de ladrillo ensayado.	70
Gráfico 7. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera en estudio.....	74
Gráfico 8. Resultados obtenidos de resistencia a la flexión para las muestras de madera en estudio.	77
Gráfico 9. Resultados obtenidos de resistencia al corte para las muestras de madera en estudio....	80
Gráfico 10. Lecturas de rebotes obtenidas en cada muestra mediante el uso del esclerómetro.	82
Gráfico 11. Resistencia a la Compresión a los 7, 14, y 28 días de la cal de la ferretería Antioquia y la Cal Nare.	86
Gráfico 12. Comparación entre el mortero ensayado con esclerómetro y ensayado con la maquina Universal.....	87



RESUMEN

La ciudad de Cartagena como Distrito Turístico, Histórico y Cultural se encuentra en constante restauración de las edificaciones y monumentos, esto con el fin de conservar el título otorgado por la UNESCO de Patrimonio Histórico de la Humanidad. 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.



ABSTRACT

The city of Cartagena as a Turistic, Historic and Cultural District is in constantly restoration of buildings and monuments, this in order to retain the title bestowed by UNESCO as a Historical Heritage of Humanity. Through this work we seek to establish if the materials that are currently used in the restoration of buildings of colonial and republican type in Cartagena are appropriate, through a comparison of their physical and mechanical characteristics with respect to the original material, in this case the brick, wood and mortar were studied.

The project was planned as an investigation of mixed type, this incorporates a descriptive and an experimental field. The project was developed primarily in five key phases: the collection and analysis of existing information, the second phase was conducted to identify the study sites (Obra Pia) and the places where the materials used at present are acquired actualmente (Ferreteria Antioquia, Ladrillera Bayunca, Maderas Carrillo, Yadira Paternina). The third phase was the realization of destructive and non-destructive testing, which includes tests such as compressive strength, flexural strength, shear strength, specific gravity and wear, etc. Conducted the first three phases proceeded to the fourth and fifth phase consisted of data analysis and presentation of the final report.

By comparing the results obtained it was concluded that the bricks of Ferreteria Antioquia and Ladrillera Bayunca are not the most suitable for restoration, because these do not have the best physical and mechanical properties compared to bricks of Obra Pia; in compressive strength the brick of Obra Pia presented 41,1Kg/cm², compared with the brick of the Ferreteria Antioquia that presented less resistance, there is a difference of 45.79% with a value of 22.3 Kg/cm².

The results respect to the wood, reflect that timber of Yadira Paternina and Maderas Carrillo perform better than wood found in Obra Pia, which shows clearly that the wood from Obra Pia did not retain its physical and mechanical properties due his great age and be exposed to the outdoor.



Nare lime and the lime distributed by Ferreteria Antioquia were used for making the mortar samples, the results of the compressive strength at 28 days show that the Nare lime has a resistance of 73.5 Kg/cm² and lime from Ferreteria Antioquia differs from it at 22% with a value of 57.1 Kg/cm², so it is concluded that the Nare lime is the most appropriate for use in restoration processes.



INTRODUCCIÓN

La restauración es el método más adecuado para conservar aquellas edificaciones u objetos arquitectónicos y Patrimoniales que se encuentran en deterioro o decadencia después de su construcción inicial, se encarga de la recuperación o bien sea de la sustitución de los materiales que hayan presentado fallas, por unos con mejor funcionamiento, sin modificar el aspecto estético o Arquitectónico de los materiales. (Terán, 2004)

Uno de los principales problemas que se presenta, es la elección adecuada de los materiales para su aplicación en la restauración. Es por eso la importancia de conocer los materiales utilizados en las antiguas edificaciones con profundidad, tanto de los que conforman su estructura constructiva, como los decorativos y sus acabados, es decir, tener conocimientos acerca de sus propiedades físicas y mecánicas.

La ciudad de Cartagena fue declarada Patrimonio Histórico de la Humanidad por la UNESCO en el año 1984, desde ese entonces se han venido realizando procesos de restauración en las edificaciones y monumentos con el fin de conservarlas, y mantener el título de Patrimonio Histórico. De lo expuesto anteriormente surgen una gran variedad de interrogantes, por lo que en ésta investigación se llega al planteamiento de los siguientes, ¿Son apropiados y cumplen con las características y propiedades físicas y mecánicas los materiales de construcción usados en la actualidad para desarrollar distintos procesos de restauración en las casas de tipología colonial y republicano en el centro histórico de la ciudad de Cartagena?, ¿En qué características y propiedades físicas y mecánicas se asemejan los materiales actuales con los materiales utilizados para la construcción original de la estructura de tales edificaciones?

Para resolver los interrogantes anteriormente planteados, se tomaron como referencia trabajos de investigación realizados por otros autores, relacionados con el estudio de las técnicas y materiales implementados para los procesos de restauración de edificaciones en el centro histórico de la ciudad de Cartagena. Uno de estos trabajos, es el realizado por J. España y M. Tapia, para la Universidad de Cartagena en el año 2008, acerca de la determinación de



ciertos parámetros que sirvieran de base para la caracterización y la normalización de estructuras de mampostería de tipología colonial. Otro trabajo analizado fue el realizado por M. Meza y J. Rhenals, para la Universidad de Cartagena como tesis de grado en el año 2011, que consistió en el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de determinados tipos de materiales usados para restaurar el cordón amurallado de la ciudad de Cartagena. Por último, se analizó el trabajo realizado por J. Ayola y M. Matute, para la Universidad de Cartagena como tesis de grado en el año 2013, que consistió en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de diferentes especies de maderas comúnmente utilizadas como vigas de entepiso en la construcción de las viviendas de tipología colonial en la ciudad de Cartagena. Con base en lo anterior, se observa que existen estudios de los materiales (ladrillo, mortero y madera), pero éstos no se enfocan en analizar a través de un estudio comparativo, las características y propiedades de los materiales actuales para restauración y los originales de la edificación, o bien sea, no tienen el mismo lugar de estudio. Por eso la importancia y pertinencia en el presente trabajo de investigación, de la realización del estudio de los materiales propios de las casas coloniales y/o republicanas, tanto aquellos usados en la construcción original, como los utilizados actualmente en las restauraciones arquitectónicas.

Como se mencionó al principio, la ciudad de Cartagena como Distrito Turístico, Histórico y Cultural es importante que conserve el título de Patrimonio Histórico de la Humanidad otorgado por la UNESCO por muchos años, debido a esto es menester verificar cuales de los materiales actuales son apropiados y cumplen con las características y propiedades físicas y mecánicas para reemplazar aquellos que se utilizaron originalmente en la construcción de las casas coloniales y republicanas en el centro histórico de Cartagena.

Para los integrantes del proyecto como estudiantes de ingeniería civil y para muchos que se encuentran en formación, sería de vital importancia este estudio y tenerlo como base para futuras investigaciones en esta misma área; para arquitectos e ingenieros profesionales también es de gran utilidad conocer a cabalidad las características físicas y mecánicas de los materiales para el proceso de restauración, por lo general no se hacen pruebas que determinen los materiales adecuados.



1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ANTECEDENTES

Por la gran importancia que posee para la ciudad de Cartagena de Indias la conservación y mantenimiento del Patrimonio arquitectónico, ha sido constante el desarrollo de procesos de recuperación y restauración de estructuras y edificaciones antiguas. A continuación se presenta una descripción básica de algunos trabajos de investigación relacionados con el estudio de las técnicas y materiales implementados para los procesos de restauración de construcciones antiguas en la ciudad de Cartagena.

- **Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipo colonial**

Este estudio fue desarrollado por J. España y M. Tapia, para la Universidad de Cartagena en el año 2008. El objetivo principal del estudio consistió en la determinación de ciertos parámetros que sirvieran de base para la caracterización y la normalización de estructuras de mampostería de tipología colonial en las edificaciones antiguas de la ciudad de Cartagena. Lo anterior presenta gran relevancia debido a que en Colombia no existen normas específicas que regulen este tipo de estructuras coloniales (España & Tapia, 2008).

El estudio se desarrolló aplicando una metodología de carácter investigativo, mediante el análisis de información existente de estudios y ensayos previamente efectuados por diferentes profesionales de la Universidad de Cartagena, complementados con datos experimentales obtenidos de ensayos de laboratorio en los cuales se analizó la variación de los valores de resistencia a la compresión de ciertos tipos de muros al usar varias combinaciones de argamasa (cal y arena) en distintas proporciones. Con base en lo anterior, los autores proponen una correlación matemática que permite calcular la carga axial que pueden resistir determinados tipos de muros con características de mampostería específicas (España & Tapia, 2008).



Este estudio es de gran utilidad para el trabajo de grado propuesto, en cuanto proporciona información importante sobre el comportamiento estructural de un aspecto fundamental en el estudio de los materiales que se tienen contemplados, debido a que al estudiarse las propiedades inherentes a la mampostería, se hace alusión directa al ladrillo y al mortero, los cuales son dos de los materiales a analizar en el presente trabajo investigativo. Sin embargo, es coherente analizar este tipo de materiales que corresponden a épocas antiguas, con respecto a los materiales que se usan en la actualidad para los procesos de restauración con el fin de evaluar tales condiciones de resistencia para la mampostería antigua y realizar análisis del comportamiento esperado de las estructuras restauradas con los materiales actuales.

- **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.**

Este trabajo fue realizado por M. Meza y J. Rhenals, para la Universidad de Cartagena como tesis de grado en el año 2011. En el mismo, la finalidad principal consistió en el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de determinados tipos de materiales usados para restaurar el cordón amurallado de la ciudad de Cartagena, teniendo en cuenta la clasificación de tales materiales según la fuente que los suministra en esta ciudad (Meza & Cohen, 2011).

Los materiales que se estudiaron fueron: la piedra caliza, el ladrillo y la argamasa; tales materiales se obtuvieron de diferentes canteras y fábricas cercanas a la ciudad de Cartagena. Para todos ellos se evaluaron las siguientes propiedades físicas y mecánicas: resistencia a la compresión, desgaste, densidad y porosidad; lo anterior se efectuó por medio de la aplicación de ensayos de laboratorio regulados por las siguientes normativas: UNE-EN 1936:1999, UNE-EN 1926:1999 y la I.N.V.E-219 (Meza & Cohen, 2011).

En el estudio se pudo observar que las piedras calizas de mejor calidad son aquellas provenientes de las canteras Coloncito y La Constancia, y por otro lado las piedras de la



cantera Guadalupe presentan las características más pobres para su uso en la restauración de las fortificaciones de muralla. Para el análisis de los ladrillos se obtuvo que la fuente que proporciona los ladrillos de mejor calidad fue la Ladrillera El Peaje, debido a que mostraron mayores valores de resistencia a la compresión. Por último, para la argamasa se concluyó que la proporción más apropiada para su uso en restauración es la de dos partes de arena por una cal, que mostró mayores valores de resistencia en la prueba de cubo (Meza & Cohen, 2011).

Este estudio se limita sólo al estudio de los materiales relacionados con la restauración de las fortificaciones amuralladas de la ciudad de Cartagena, por lo cual el análisis de las condiciones de resistencia puede ser diferente para los materiales requeridos en la restauración de edificaciones de otro tipo, como por ejemplo las viviendas y construcciones de uso gubernamental que se encuentran en el Centro Histórico. Y es por ello que resulta trascendental y pertinente la realización del estudio de los materiales propios de las casas coloniales, tanto aquellos usados en la construcción original como los utilizados actualmente en las restauraciones arquitectónicas.

- **Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera utilizada como viga de entrepiso en las viviendas coloniales del centro histórico de la ciudad de Cartagena.**

Este trabajo fue realizado por J. Ayola y M. Matute, para la Universidad de Cartagena como tesis de grado en el año 2013. El objetivo principal de este trabajo de investigación consistió en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de diferentes especies de maderas comúnmente utilizadas como vigas de entrepiso en la construcción de las viviendas coloniales en la ciudad de Cartagena (Ayola & Matute, 2013).

Además de ello, se realizó una clasificación de las maderas estudiadas según los distintos grupos de madera estructural que se tienen en cuenta en las normas NSR 2010 y EL MANUAL DEL PACTO ANDINO, para luego evaluar el comportamiento de cada tipo de



madera al someterse a diferentes condiciones de carga, usando simulaciones computarizadas (Ayola & Matute, 2013).

Las clases de madera que mejor comportamiento presentaron luego del análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio fueron la de Puy, Guayacán y Campano; de entre las cuales se destaca la de Puy en la que se observaron esfuerzos admisibles a flexión de 25.30 (Kg/cm²), compresión 366.90 (Kg/cm²), tensión 1405.64 (Kg/cm²) y cortante 41.69 (Kg/cm²). Por otro lado, se observó que al realizar las simulaciones para cada tipo de madera, ninguna cumplió los requisitos de resistencia para la solicitud de carga analizada, según los parámetros de las normas NSR 10 y EL MANUAL DEL PACTO ANDINO (Ayola & Matute, 2013).

Esta investigación presenta datos muy importantes en cuanto a la caracterización, propiedades y comportamiento estructural de la madera usada en la construcción de viviendas coloniales, aunque de manera específica se enfoca en las maderas utilizadas en vigas de entrapiso. Teniendo en cuenta el anterior punto de vista, la investigación se encuentra limitada a un aspecto reducido, ya que en el presente trabajo de grado, se pretende estudiar además de la madera, otros materiales como los ladrillos y el mortero. Sin embargo, es necesario destacar que la investigación es de gran utilidad como un referente específico para el análisis de las propiedades y el estudio de las normativas relacionadas con los requerimientos y ensayos de laboratorio asociados el análisis de la madera.



1.2. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de procesos de restauración arquitectónica de edificios antiguos representa un importante objeto de estudio para las áreas del conocimiento afines al campo de la construcción, principalmente si se tiene en cuenta que constituye un punto de conexión entre las teorías, técnicas y metodologías de construcción del pasado y del presente, y a su vez permite la conservación del patrimonio arquitectónico involucrando los conocimientos, recursos y materiales de construcción actuales sin afectar el entorno y la estética de la construcción original.

La restauración arquitectónica supone un mantenimiento y recuperación de las condiciones de una estructura antigua con el ánimo de devolverla en el mayor grado posible a su estado original y restituir su valor y cualidades estéticas o históricas. Es por ello que cada proceso de restauración, implica intrínsecamente una serie de estudios rigurosos que permiten la determinación de las condiciones de deterioro de la estructura, el tipo de intervención a realizar, la metodología a usar y la elección adecuada de los materiales de construcción a utilizar y de los procedimientos y técnicas para su aplicación en la restauración (Terán, 2004). Precisamente es éste último punto el que concierne a la presente investigación, fundamentando la importancia del estudio de las principales propiedades de los materiales de construcción usados para los procesos de restauración en cuanto a su influencia en la evaluación que corresponda para determinar si éstos son o no los materiales apropiados para reemplazar o consolidar a los ya existentes.

En el caso de esta investigación, el análisis de materiales se centrará en tres casos específicos, los cuales son: los bloques o ladrillos de arcilla, los morteros para mampostería y la madera. A continuación se presenta un compendio de la información correspondiente a diverso material de tipo científico, el cual sirve de referencia para conocer lo que se ha hecho, y lo que se viene haciendo en cuanto al estudio de las propiedades y características de estos materiales de construcción asociados íntimamente con el aspecto de la restauración arquitectónica.



1.2.1. Caracterización y estudio de las propiedades de bloques de arcilla y morteros para mampostería.

- **Comportamiento a la compresión de mampostería inconfínada y confinada de ladrillos de arcilla.**

En el año 2004, los profesores de la Universidad Estatal de Carolina del Norte (EEUU), Bryan Ewing y Mervyn Kowalsky, adelantaron un estudio sobre el comportamiento de los bloques de arcilla a la compresión bajo condiciones en presencia y ausencia de confinamiento. El objetivo principal de la investigación consistía en el análisis de la influencia que el uso de ciertas placas de confinamiento tiene en el comportamiento de la mampostería de ladrillos de arcilla con respecto a la resistencia a la compresión. Para ello los investigadores construyeron 15 prismas de ladrillos aportando tres muestras de ensayo para cada una de las cinco distintas configuraciones planteadas: un muro Wythe simple (inconfínado) y cuatro muros Wythe doble, de estos últimos sólo una configuración es inconfínada y las otras tres poseen confinamiento usando diferentes tipos de placas (Ewing & Kowalsky, 2004).

Mientras que para el muro Whyte simple inconfínado la resistencia a la compresión obtenida fue de 15,56 MPa en promedio, para el muro Whyte doble inconfínado se obtuvo una resistencia de 25,9 MPa. Sin embargo para las configuraciones de muros Whyte doble con distintos tipos de confinamiento, se obtuvieron valores mayores de resistencia a la compresión, alcanzando inclusive los 36,69 MPa (Ewing & Kowalsky, 2004).

A partir de lo anterior, el estudio concluye que el uso de confinamiento para la construcción de mampostería en ladrillos de arcilla puede mejorar la resistencia última a la compresión en el orden de un 40% (Ewing & Kowalsky, 2004).

En el marco del desarrollo del presente trabajo de grado, se evidencia cierto grado de limitación que representa la información del estudio planteado, ya que no se considera importante el análisis del comportamiento de la mampostería de ladrillo en condiciones especiales de confinamiento. Aunque la información relacionada con el comportamiento de



la mampostería de ladrillo en condiciones normales (sin confinar), puede ser de utilidad para contar con datos de referencia al momento de la revisión de los resultados que se obtengan tras la realización de los ensayos de laboratorio previstos.

- **Durabilidad de ladrillos usados en la conservación de construcciones históricas – influencia de la composición y la microestructura.**

Este estudio fue desarrollado por K. Elert, G. Cultrone, C. Rodríguez y E. Pardo, y corresponde a una investigación del Departamento de Mineralogía y petrología de la Universidad de Granada (España), la cual fue publicada en el año 2003.

La investigación estuvo centrada en el análisis de diversos factores que influyen en la durabilidad a largo plazo de los ladrillos usados para los procesos de conservación y restauración de edificaciones históricas. Se revisaron dos tipos de muestras de ladrillos según su composición y microestructura, clasificándolos en ladrillos calcáreos y no-calcáreos. Además se tomó como factor de revisión la influencia de los noveles de temperatura a los cuales son calentados los ladrillos en el proceso de fabricación (Elert, Cultrone, Rodríguez, & Pardo, 2003).

A partir de esta investigación fue posible concluir que el efecto de altas temperaturas de cocción, correspondientes a 1100°C en el caso de los ladrillos calcáreos y de 1000°C en el de los no calcáreos, genera ladrillos de mayor durabilidad resistentes a condiciones de desgaste por exposición a la intemperie (Elert, Cultrone, Rodríguez, & Pardo, 2003).

Por otro lado se observan niveles más altos de resistencia a la compresión y a la vitrificación para los ladrillos calcáreos en comparación con los no calcáreos, con temperaturas de cocción más bajas, entre los 700 y 900°C. Las condiciones de grado de vitrificación, porosidad y distribución del tamaño de poros, están intrínsecamente ligadas a la composición de la arcilla y la temperatura de cocción de los ladrillos (Elert, Cultrone, Rodríguez, & Pardo, 2003).



Por último se resalta un aspecto muy importante de la investigación, donde se aclara que para los procesos de restauración de edificaciones antiguas donde es necesario reemplazar ladrillos, es recomendable realizar estudios que permitan determinar las condiciones específicas de fabricación de los ladrillos que servirán de reemplazo y no simplemente optar a priori por materiales de mejor calidad, esto con el fin de no generar impactos desestabilizantes en la estructura que puedan inducir deterioros en secciones de mampostería en aparente buen estado (Elert, Cultrone, Rodríguez, & Pardo, 2003).

Las limitaciones que presenta el abarcar la información de este estudio se reflejan en los análisis específicos del efecto de ciertos componentes moleculares que conforman la microestructura del material de fabricación del ladrillo; tales análisis van más allá del alcance del trabajo de grado que se está desarrollando. Sin embargo, las conclusiones generales del estudio son de gran utilidad para complementar los análisis previstos en el desarrollo de los estudios y ensayos de laboratorio a realizar.

- **Ladrillos en construcciones históricas de la ciudad de Toledo: caracterización y restauración.**

Este estudio fue realizado por P. López-Arce, J. García-Guinea, M. Gracia y J. Obis, en el año 2003. Se planteó la caracterización de dos tipos de ladrillos provenientes de edificaciones antiguas de la ciudad de Toledo, que datan de los siglos XII y XIV.

La caracterización de los dos tipos de ladrillos en estudio se realizó mediante diversas técnicas de análisis entre las cuales se encuentran: microscopio óptico, microscopio de escaneo electrónico / espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (SEM/EDS), microanálisis de sondeo de electrones (EM), difracción de rayos X (XRD), análisis de temperatura diferencial (DTA) y espectroscopía de Fe-Mossbauer (López-Arce, García-Guinea, Gracia, & Obis, 2003).

Se estudiaron los componentes principales de las arcillas empleadas para fabricar los ladrillos analizados, entre los cuales se pudo encontrar: calcita, dolomita, ilita, gehlenita y dióxido



relacionados con la fase de altas temperaturas de cocción; calcita secundaria, presente en las primeras fases de enfriamiento; y micronódulos de manganeso relativos a condiciones de contaminación ambiental (López-Arce, García-Guinea, Gracia, & Obis, 2003).

Además de ello, se determinaron ciertas propiedades físicas de los especímenes en estudio como por ejemplo: la absorción y succión de agua, porosidad, densidad y resistencia a la compresión (López-Arce, García-Guinea, Gracia, & Obis, 2003).

El análisis de este estudio presenta una limitación importante que radica en la interpretación de datos relacionados con la presencia de ciertos componentes químicos específicos que se encuentran fuera del alcance del presente trabajo de grado. Sin embargo, se presenta información derivada del análisis de los resultados obtenidos de los diversos ensayos, que es de gran utilidad para la comprensión de la importancia del estudio de las propiedades de los materiales originales, para ser reemplazados por los materiales adecuados en los procesos de restauración arquitectónica.

- **Identificación de mampostería de ladrillo en un edificio histórico complejo, el Colegio Mayor de la Universidad de Alcalá, Madrid (España).**

En cuanto a investigaciones actuales al respecto de las propiedades de bloques de arcilla y morteros para mampostería en edificaciones antiguas, se puede resaltar un reciente estudio del año 2013 que ha sido publicado en el año 2014, en el cual se realiza un análisis profundo de las características propias de diversos tipos de bloques de arcilla y morteros que se encuentran en el edificio de la Universidad de Alcalá en Madrid, España.

El estudio fue realizado por G. Barluenga, F. Estirado, R. Undurraga, J. Conde, F. Agua, M. Villegas y M. García-Heras, todos ellos académicos pertenecientes al Departamento de Arquitectura de la Universidad de Alcalá (Madrid) y al Instituto de Historia, Centro de Ciencias Humanas y Sociales de Madrid. La edificación correspondiente al complejo histórico de la Universidad de Alcalá, fue fundado en 1495 y declarado patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en el año de 1998 (Barluenga, y otros, 2014).



El objetivo principal de la investigación consistió en analizar ampliamente diversas características y propiedades inherentes a los diferentes tipos de bloques de arcilla y morteros, evaluando sus principales componentes, y aspectos morfológicos (Barluenga, y otros, 2014).

La metodología que se implementó en la realización del estudio contempló cuatro pasos principales: estudios históricos y morfológicos preliminares, recolección de muestras, caracterización de los materiales, y un análisis integral de los resultados obtenidos con base en los patrones de construcción de la mampostería analizada y datos históricos. Las muestras fueron extraídas cuidadosamente de ciertos puntos específicos determinados luego de un estudio que involucraba el desarrollo histórico de la construcción, teniendo en cuenta que en algunos muros los materiales pudieron haber sido reemplazados por otros de distinta época según las diversas modificaciones que pudo haber sufrido la edificación; lo anterior presenta la mayor importancia y a su vez la mayor dificultad que representó el proceso investigativo para los analistas, el hecho de identificar los diferentes tipos de materiales y correlacionarlos con ciertos períodos históricos con el fin de proveer un soporte científico que ayude a la toma de decisiones para futuros procesos de restauración y conservación (Barluenga, y otros, 2014).

Para realizar la caracterización de los materiales se implementaron los siguientes ensayos: microscopía electrónica de barrido (SEM), espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS), microscopía de luz polarizada de sección delgada (microscopio petrográfico), difracción de rayos X (XRD), termo-gravimetría (TG), y análisis térmico diferencial (DTA) (Barluenga, y otros, 2014).

En el análisis de los morteros se observó que la mayoría de las muestras correspondían a morteros de cal (con contenido de calcita y gehlenita), del total de las muestras estudiadas se pudo determinar además que los componentes principales de los morteros eran el óxido de calcio (CaO) y sílice (SiO₂, principal componente de la arena) con una concentración promedio del 80%. Por otro lado también se encontraron otros componentes menores como la alúmina (Al₂O₃), el óxido de hierro (Fe₂O₃), el óxido de magnesio (MgO) y el óxido de



azufre (SO₃), los cuales están en concentraciones algo por encima del 3% aproximadamente (Barluenga, y otros, 2014).

En cuanto al análisis de los ladrillos, se encontraron tres tipos de ladrillo que se pueden diferenciar en la construcción estudiada. El tipo 1, corresponde a ladrillos de arcilla calcárea de textura fina con un alto grado de birrefringencia se notan abundantes inclusiones de chamotte (fragmentos de cerámica triturados) que mejoran las propiedades mecánicas del ladrillo. El tipo 2, presenta arcilla calcárea bien gradada, con baja birrefringencia y signos de vitrificación. Por último el tipo 3, muestra arcilla no calcárea birrefringente y mal gradada (Barluenga, y otros, 2014).

El estudio presenta información muy detallada en cuanto a la caracterización de los tipos de ladrillos y morteros usados en la construcción y subsecuentes remodelaciones y restauraciones de la edificación de la Universidad de Alcalá en Madrid. Sin embargo, gran parte de la información es sumamente específica de ese caso de estudio, lo cual, puede ser una limitante en cuanto al análisis de resultados obtenidos; pero sin duda, puede ser de gran utilidad para conservar una referencia del proceso metodológico que puede establecerse para llevar a cabo la caracterización de los materiales que se encuentran en las construcciones del Centro Histórico de Cartagena de Indias que servirán de casos de estudio en el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.2.2. Estudio de propiedades y características de la madera en construcciones antiguas.

- **Comportamiento a flexión y cizalladura de vigas de madera antiguas: evaluación experimental y teórica.**

Este estudio fue desarrollado en el año 2005, por C. Calderoni, G. De Matteis, C. Giubileo y F.M. Mazzolani. Tal estudio corresponde a la Universidad de Nápoles “Federico II”, y contempla el análisis teórico y del comportamiento a flexión y cizalladura de vigas de madera en edificaciones antiguas. El estudio se realizó con base en muestras de vigas de madera



correspondientes a losas de entrepiso y que constituyen una representación típica de las vigas de madera que se pueden encontrar en la mayoría de las construcciones históricas en los países del Mediterráneo (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2006).

Los ensayos de laboratorio correspondientes a la etapa experimental de la investigación propuesta se basaron en el análisis de las condiciones de resistencia a la flexión y cizalladura de una serie de cuatro vigas de castaño de dimensión real, las cuales fueron extraídas del entrepiso de un antiguo edificio de mampostería de varios pisos ubicado en el centro histórico de la ciudad de Nápoles, la cual fue construida a inicios del siglo XIX. Las vigas que se usaron en los ensayos eran de 4 metros de largo aproximadamente y poseían secciones circulares con diámetros entre los 20 y 25 centímetros (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2006).

Una de las principales preocupaciones de los investigadores consistió en que debido a que las vigas de madera se obtenían directamente descortezando los troncos de los árboles, las secciones transversales a lo largo del miembro son variables. En la superficie externa, las vigas mostraban varias irregularidades debido a la forma natural del tronco y cierto estado de degradación en el material base. Algunos de los defectos más importantes que se encontraron en las vigas fueron: división longitudinal, grietas, zonas degradadas y agujeros debido a ataques de insectos (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2006).

Dentro de las conclusiones que arrojó el estudio, se puede considerar que se evidencia el gran efecto que sufren las estructuras de madera en edificaciones antiguas debido al deterioro de material por factores externos, ya que reducen drásticamente las propiedades mecánicas del material para soportar los esfuerzos. Se observó que los valores de resistencia máxima a la flexión para las vigas oscilan entre los 30.5 y los 43 MPa. Por otro lado, los resultados de resistencia a la cizalladura varían entre los 27.38 y los 33.29 kN (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2006).

La información aportada por esta investigación es de suma utilidad para el desarrollo del presente trabajo de grado, en la medida que facilita datos importantes sobre el comportamiento de la madera estructural y sobre las metodologías de ensayo y análisis que



se pueden implementar en el desarrollo del trabajo de grado. La única limitación aparente es el hecho de que el material usado corresponde a maderas de diferentes propiedades por el hecho de pertenecer a una región geográfica totalmente diferente.

- **Correlaciones experimentales entre los ensayos destructivos y los no destructivos de elementos de madera antiguos.**

Un estudio más reciente llevado a cabo por C. Calderoni, G. De Matteis, C. Giubileo y F.M. Mazzolani para la misma Universidad de Nápoles “Federico II”, en el año 2009, presenta el desarrollo de un proceso encaminado a la obtención de modelos matemáticos que permitan correlacionar los datos obtenidos de ensayos destructivos de muestras de maderas con datos de ensayos no destructivos, con el fin de facilitar el estudio de las condiciones en las cuales se encuentran los elementos estructurales (y no estructurales también) de edificaciones antiguas, los cuales hayan sido construidos en madera (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2010).

Lo anterior proporcionaría una gran ventaja en el campo de los estudios correspondientes a la determinación de las condiciones y metodologías a usar para los procesos de restauración de construcciones antiguas en la medida de que significaría una gran ventaja el hecho de no tener que extraer y destruir un material para conocer su estado, cuando es posible que aún cumpla con las condiciones suficientes para funcionar debidamente (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2010).

En este estudio se presenta entonces el proceso de cálculo de la correlación entre los ensayos no destructivos (llevados a cabo por medio de equipo resistográfico) y los ensayos destructivos, para vigas de madera de castaño. Lo anterior con el fin de definir una metodología que permita obtener y determinar las propiedades del material y la capacidad de soporte de elementos estructurales de madera directamente de mediciones resistográficas (Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2010).



Este estudio es de gran importancia para el desarrollo de análisis y comparaciones entre los resultados que se puedan obtener de la aplicación de ensayos tanto destructivos como no destructivos, los cuales se tienen planteados en el desarrollo del presente trabajo de grado. Inclusive, la correlación matemática que se obtiene a partir de la investigación realizado por estos científicos puede incluso ser conveniente para la realización de ciertos cálculos específicos en este trabajo.



1.3. MARCO TEORICO

1.3.1. Materiales de construcción a estudiar

- **Ladrillo de Arcilla**

Bloque de arcilla o cerámica cocida empleado en la construcción y para revestimientos decorativos. Los ladrillos pueden secarse al sol, pero acostumbran a secarse en hornos. Resisten 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.

Algunos ladrillos están hechos de arcillas resistentes al fuego para construir chimeneas y hornos. Otros están hechos con vidrio o se someten a procesos de vitrificación. Los ladrillos se pueden fabricar de diferentes formas, dependiendo de la manera en que se vayan a colocar sus costados largos (al hilo) y sus extremos cortos (cabezales)

El ladrillo era conocido por los indígenas americanos de las civilizaciones prehispánicas. En regiones secas construían casas de ladrillos de adobe secado al sol. Las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos fueron construidas con ladrillos revestidos de piedra. Pero fue en España donde, por influencia musulmana, el uso del ladrillo alcanzó más difusión, sobre todo en Castilla, Aragón y Andalucía.

El ladrillo industrial, fabricado en cantidades, sigue siendo un material de construcción versátil. (Arcillas de Colombia, s.f.)

- **Madera**

La madera es un material duro y resistente que constituye el tronco de los árboles, la madera no es un material homogéneo, o sea, no tiene una estructura uniforme y debe cumplir en el árbol o vegetal vivo tres funciones: la conducción de la savia, o sea agua y sustancias disueltas, la transformación y almacenamiento de sustancias de reserva y el sostenimiento o resistencia mecánica del vegetal.



- **Argamasa**

Mortero y material base compuesto por una mezcla de arena, agua y cal, éste último el conglomerante en éste caso que al secarse adquiere una condición bastante sólida aunque es menor que en la del hormigón. En su mezcla de la argamasa toma especial importancia el empleo de los áridos como materiales naturales como de la arena, grava y la gravilla, en su mezcla se tienen presentes las medidas de sus materias en cantidades determinadas y específicas.

- **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 en 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.
- Cal hidráulica: Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílica (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

1.3.2. Propiedades físicas y mecánicas a analizar

- **Densidad o Peso Específico**

La densidad es una propiedad física de la materia utilizada para determinar la cantidad de masa (M) contenida en un determinado volumen (V). Está relacionada con la naturaleza de

sus componentes y la porosidad existente entre ellos. Las unidades de la densidad son variadas, la utilizada por el Sistema Internacional es kilogramo por metro cubico.

$$D = M / V \quad (1)$$

Teniendo los valores de la masa y el volumen de la muestra, inmediatamente se puede determinar la densidad. La densidad se divide en densidad aparente, densidad real y densidad del sólido.

El volumen total o volumen aparente de un material, V_{ap} , está formado por el volumen de sólido, V_s , más el volumen de huecos inaccesibles, V_{vi} , más el volumen de huecos accesibles, V_{va} . (Martín, 1996)

$$\text{Densidad aparente: } \gamma_d = \frac{M_s}{V_{ap}} = \frac{\text{Masa del material}}{\text{Volumen Aparente}} \quad (2)$$

$$\text{Densidad Real: } \gamma_r = \frac{M_s}{V_s + V_{vi}} \quad (3)$$

$$\text{Densidad Real: } \gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

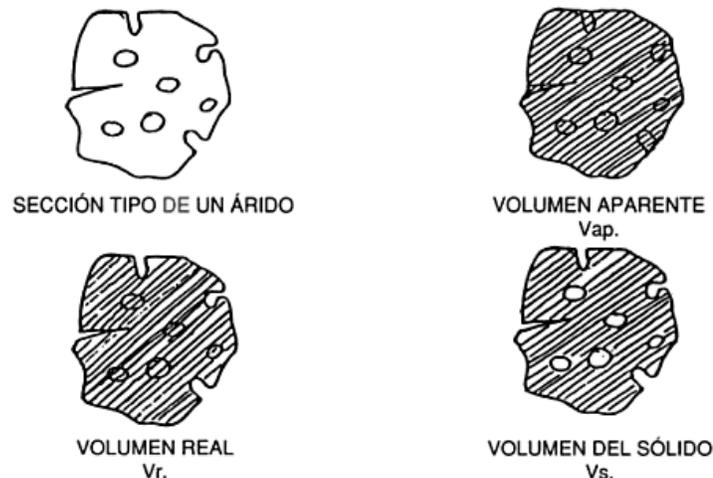


Figura 1. Distintos tipos de volúmenes para determinar las densidades.

Fuente: (Martín, 1996)



- **Gravedad Específica y Absorción**

- **Gravedad específica**

Relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

- **Gravedad Específica Bulk**

Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsb = \frac{A}{B-C} \quad (5)$$

- **Gravedad Específica Bulk Aparente**

Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsa = \frac{B}{B-C} \quad (6)$$

- **Gravedad Específica Bulk en condición Saturada y Superficialmente Seca**

Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión durante 15 horas (pero sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsb_{sss} = \frac{A}{A-C} \quad (7)$$

- **Absorción**

Es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado, después de secado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.



$$\%Absorción = \frac{B-A}{A} \quad (8)$$

Donde:

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

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

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

- **Dureza**

La dureza de un material es su capacidad de resistir una deformación plástica localizada. Las medidas de dureza son ampliamente utilizadas porque a partir de ellas se obtiene una idea aproximada o comparativa de las características mecánicas de un material.

Para su determinación se utilizan ensayos basados en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados por un cuerpo más duro. Estos métodos consisten en producir una huella en el material que se ensaya aplicando sobre él un penetrador con una presión determinada, y hallando el índice de dureza en función de la presión ejercida y la profundidad o diámetro de la huella. Este penetrador va acoplado a una máquina llamada durómetro. Los tres métodos más utilizados son los de Brinell, Rockwell y Vickers.

- **Dureza Brinell**

Consiste en comprimir una bola de acero templado, de un diámetro determinado, sobre el material a ensayar, por medio de una carga y durante un tiempo también establecido.

La dureza Brinell determina la relación entre la fuerza ejercida por el durómetro y el área de casquete de la huella, pues evidentemente, y dentro de ciertos límites, esta área será mayor cuanto menos duro sea el material.

La expresión matemática de la dureza Brinell es $HB=P/A$ (9)

Se puede deducir la expresión en función del diámetro del casquete, el diámetro de la bola y la carga empleada:

$$HB = \frac{2P}{D*\pi[D-\sqrt{(D^2-d^2)}]} \quad (10)$$



El ensayo Brinell no debe aplicarse para medir durezas superiores a 500 HB, y no es fiable para materiales de poco espesor.

- **Dureza Vickers**

El penetrador usado es una pirámide regular de base cuadrada, de diamante, cuyas caras laterales forman un ángulo de 136°, con precisión obligada de 20 segundos. Se recomienda usar este ensayo para durezas superiores a 500 HB. Se puede utilizar tanto para materiales duros como blandos, y además los espesores de las piezas pueden ser muy pequeños.

Las cargas aplicadas son más pequeñas que en el método Brinell (oscilan entre 1 y 120 kp).

La determinación de la dureza Vickers se hace en función de la diagonal de la huella, o más exactamente, de la media de las dos diagonales medidas con un microscopio en milésimas de milímetro. La expresión matemática en función de la diagonal de la huella y la carga P con la que se efectúa el ensayo es

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (11)$$

- **Dureza Rockwell**

Este método se diferencia de los anteriores en que la medida de la dureza se hace en función de la profundidad de la huella y no de su superficie. Se utiliza como penetrador una punta de diamante en forma de cono para materiales duros (HRC), o de bola para materiales blandos (HRB).

Con el fin de tener en cuenta las posibles recuperaciones producidas por la elasticidad de los materiales, se comienza por aplicar una primera carga de 10 kg, poniendo a continuación el indicador que mide la penetración a cero. Después se completa la carga hasta llegar a la total del ensayo: 90 kg para el penetrador de bola o 140 kg para el penetrador cónico, durante un corto espacio de tiempo (entre 3 y 6 segundos). Se retira



esta carga adicional, y la profundidad a la que queda el penetrador es la que se toma para calcular la fuerza.

El número que mide la dureza no está ligado con la carga, (como sucede en Brinell), sino que es un número arbitrario, pero naturalmente proporcional a la penetración.

Se determina deduciendo de 100, si se ensaya con diamante, y del 130, si se ensaya con bola, las unidades de penetración permanente, y cada unidad equivale a 0,002 mm. Esto se hace para que a los materiales más duros correspondan más unidades de dureza que a los blandos, cosa que no ocurriría si la dureza se diese directamente por las unidades de penetración, puesto que a mayor penetración el material sería más blando. La lectura de la dureza se realiza directamente sobre el comparador ampliando el recorrido del penetrador. (Aula de Tecnologías, 2009).

- **Ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles**

El principal objetivo de la prueba de desgaste por medio de la Máquina de los Ángeles es el de determinar la resistencia en la trituración o abrasión de los materiales pétreos. La resistencia al desgaste es una propiedad que depende de la dureza del material.

Para determinar la resistencia se hace actuar una carga abrasiva sobre la muestra de material que se desee analizar. La carga abrasiva la proveen unas esferas metálicas estandarizadas que al interactuar con la muestra de material dentro de la máquina alteran su composición granulométrica triturando el material, como resultado se obtiene una pérdida de material con respecto a su masa inicial que determina la calidad del mismo ante el desgaste o la abrasión.

- **Porosidad**

La porosidad se define como el volumen de espacios vacíos en el volumen total de la roca. La porosidad se relaciona con la capacidad de absorción de agua del material, ya que entre más poroso es el material, posee por lo tanto más espacios vacíos por los cuales puede penetrar el agua.



La porosidad se puede determinar mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{D-Da}{D} \times 100 \quad (12)$$

Donde:

- P: porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra.
- D: densidad real del suelo.
- Da: densidad aparente del suelo.

- **Resistencia a la Compresión**

La resistencia a la compresión de un material es el punto en el cual éste falla. Calcular la fuerza de compresión implica realizar pruebas para hallar el punto de falla, y utilizar los datos del experimento para realizar los cálculos. En ingeniería, el ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y metales (sobre todo aceros), aunque puede realizarse sobre cualquier material.

La forma y el tamaño de la probeta son importantes a la hora de realizar experimentos de resistencia a la compresión para un mismo material, ya que influyen en los resultados. Así, los prismas y cilindros largos presentan menores resistencias a la compresión que los cubos con la misma área de sección, y estos a su vez menor que los prismas y cilindros cortos (con alturas menores que sus lados o radios). Igualmente, la resistencia a la compresión depende de la tasa de aplicación de la carga, de forma que a mayores velocidades de compresión mayor es el valor de la resistencia. (Guzmán, 2001)

El esfuerzo es igual a la fuerza aplicada por sección o superficie:

$$\sigma l = \frac{F_i}{S} \quad (13)$$



- **Resistencia a la flexión**

Consiste en la medida de la resistencia de un elemento o miembro estructural a las fuerzas flectoras. Se denomina flexión al tipo de deformación que sufre un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector (Beer, E., & DeWolf, 1992).

En madera es preciso hablar de una resistencia a la flexión, aunque esté formada por la combinación de una tracción y una compresión, ya que el comportamiento mecánico de estas dos propiedades es diferente, y por tanto resulta más práctico referirse al efecto conjunto de ambas en el caso de flexión. Esta propiedad es importante en piezas tales como vigas, viguetas de forjado, pares de cubierta, etc.

- **Resistencia al corte o cizalladura**

Representa la medida del esfuerzo de corte máximo que es capaz de soportar un elemento estructural antes de su ruptura. El esfuerzo de corte o cizalladura es el esfuerzo interno que es producido por las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico, como por ejemplo una viga o un pilar (Beer, E., & DeWolf, 1992).

El esfuerzo cortante puede originar tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos.

- Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.
- Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.
- Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras.

La medida de la resistencia al corte en maderas también se puede ligar al análisis del módulo de cortante.



1.3.3. Normas de referencia para ensayos de laboratorio para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas

- **NTC-4017: Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla.**

Esta norma contiene las especificaciones y parámetros a tener en cuenta para la realización de ensayos a especímenes de ladrillos elaborados con arcilla. Los métodos de ensayo que contempla esta norma son: Determinación de masa, módulo de rotura (ensayo de flexión), resistencia a la compresión, absorción de agua, congelamiento y descongelamiento, tasa inicial de absorción, eflorescencia, medición del alabeo, medición del área de vacío en unidades perforadas, entre otros. Para la realización del presente trabajo de grado se tendrá como referencia la norma para los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de rotura de ladrillos de arcilla (ICONTEC, 2005).

La NTC-4017, está basada en la norma ASTM C 67, y contiene referencias de las normas NTC 121, NTC 2086, NTC 4227, NTC 5202, ASTM E 6, entre otras.

- **NTC-220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado.**

Esta norma se tomará como referencia para la realización del ensayo de resistencia a la compresión para mortero o argamasa elaborado con cal. El procedimiento consiste básicamente en el ensayo de probetas cúbicas de mortero de 50 mm o 50,8 mm, en una máquina hidráulica o mecánica que aplica una carga de compresión sobre cada probeta a una velocidad determinada. Esta norma está basada en la norma ASTM C 109M-2002 (ICONTEC, 2004).

- **NTC-290: Maderas. Determinación del peso específico aparente.**

Esta norma contiene las especificaciones correspondientes al método de ensayo para la determinación del peso específico aparente de la madera, teniendo en cuenta su contenido de humedad. Se determinaran el peso y el volumen de probetas de madera que consisten en



prismas rectos de 3cm x 3cm de sección transversal y 10cm de longitud, según sean las condiciones de la madera (madera en estado verde, en estado anhidro, o tratadas en ambiente climatizado). Esta norma se basa en la Norma Panamericana COPANT 461 (ICONTEC, 1974).

- **NTC-775: Maderas. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano.**

En esta norma se describe el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al cizallamiento de dos probetas de madera de 5cm x 5cm x 6,25 cm con una de sus caras recortadas. Se utiliza una prensa capaz de aplicar una presión superior a 2000 Kgf para inducir la presión sobre la probeta a ensayar usando un dispositivo que posee una cizalla libre que se mueve en semicírculo. Esta norma se basa en la Norma Panamericana COPANT 463 (ICONTEC, 1974).

- **NTC-663: Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión.**

En esta norma se presenta la metodología de ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión de especímenes de madera. Las probetas de ensayo deben ser de sección cuadrada con un espesor igual al ancho entre 20 y 50 mm, y cuya longitud debe ser mínimo 18 veces el ancho. La probeta se coloca sobre dos soportes y se le aplica la carga en el centro de la luz entre tales soportes (cuya magnitud será de mínimo 18 veces el espesor). La carga se debe aplicar de forma continua y constante para obtener una deformación de 2,5 mm por minuto. La lectura de carga debe efectuarse en intervalos de 0,02 mm de deflexión. Esta norma se basa en el Método ASTM D 143-52 (ICONTEC, 1973).

1.3.4. Ensayos no destructivos (END)

- **Esclerómetro o martillo de Schmidt**

Este ensayo fue propuesto inicialmente para estimar la resistencia a compresión simple del concreto, pero debido a su facilidad de uso y a su aplicación extendida, se ha modificado en



ciertas ocasiones para usarse en la determinación de la resistencia a la compresión en otros materiales distintos al concreto (Guzmán, 2001).

Su uso es muy frecuente dada la manejabilidad del aparato, pudiendo aplicarse sobre roca matriz y fundamentalmente sobre las discontinuidades (resistencia de los labios). Consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de roca ensayada. La medida de rebote se correlaciona mediante un gráfico debido a Miller (1965) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado.

El desarrollo del ensayo consiste en una preparación de zonas elegidas, eliminando la pátina de meteorizada. Se efectúan 10 percusiones con el martillo en la zona elegida y se eliminan los 5 valores más bajos, efectuando el promedio de los restantes. Una vez ensayadas todas las zonas necesarias, se llevan al gráfico de correlación y se obtienen unos valores estimativos de la resistencia a compresión simple de la roca obteniendo una idea de su estado y calidad. El registro de los datos se realiza sobre unos impresos preparados para tal fin, que facilitan la interpretación de los mismos (Ayala & Andreu, 1987).

- **Métodos Ultrasónicos**

Los métodos de ensayo por ultrasonido se basan en el análisis de ciertas propiedades de los materiales, teniendo en cuenta los registros de ondas de sonido a alta frecuencia. Las ondas acústicas de alta frecuencia son aquellas que superan los 20KHz, es por ello que el sistema se denomina como ultrasónico.

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cuál mediante un cristal piezoeléctrico interno genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. A su vez los transductores o palpadores han de ser acoplados a la superficie de la fábrica mediante medios acoplantes para transmitir el máximo de energía posible. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cual a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica. El tiempo de



la transmisión puede visualizarse mediante un display de lectura, generalmente en microsegundos.

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de transformar una corriente eléctrica en oscilaciones mecánicas, de esta forma cuando una carga eléctrica es aplicada sobre las caras polarizadas de este tipo de cristales produce un desplazamiento mecánico que origina una oscilación. Como ejemplos de dichos materiales pueden referirse el cuarzo, el titanato de bario, o el circonato de plomo y titanio. Un transductor se caracteriza por su frecuencia de transmisión, por la posición del cristal, por su forma (cilíndrica o cónica), por su sensibilidad (capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica acústica) y por su poder resolutivo (capacidad de detectar las señales de dos discontinuidades muy próximas). El material acoplante mejora la transmisión de las oscilaciones producidas por el cristal (ejemplos: vaselina o grasa consistente).

Debido a su corta longitud de onda los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que éstos son muy direccionables. Cuanto mayor es la longitud de onda mayor es la dispersión angular que se produce. Dada la limitación de los ensayos ultrasónicos para evaluar materiales muy heterogéneos hace que los ensayos de velocidad de pulso sónico sean más apropiados para fábricas. Sin embargo en el caso de unidades de baja porosidad o empleo de morteros para macizar las cavidades presentes en la pared, los ensayos ultrasónicos pueden ser empleados satisfactoriamente. Del mismo modo los ultrasonidos son aplicables a la evaluación de elementos pétreos aislados (mampuestos o sillares de compacidad adecuada) o probetas extraídas de los mismos, para poder valorar tanto propiedades físicas como mecánicas. En torno a los 50 KHz son las frecuencias más apropiadas para la comprobación ultrasónica en materiales rocosos (Berganza & Hernández, 2007).



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer si los materiales que se usan actualmente en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicana en Cartagena son los adecuados, a través de una comparación de sus características físicas y mecánicas con la de los materiales originales, con el fin de coadyuvar a que la ciudad conserve el título de Patrimonio Histórico de la Humanidad.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar y realizar la caracterización de los materiales a estudiar específicamente, los cuales son: ladrillo, madera y mortero.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales actuales y los originales recolectados en las edificaciones en restauración, mediante ensayos destructivos y no destructivos.
- Realizar la comparación de las características y las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados actualmente con la de los materiales originales.
- Determinar mediante un análisis de los resultados obtenidos, si los materiales que se usan actualmente en la restauración de edificaciones de tipología colonial y republicana en la ciudad de Cartagena son los adecuados.
- Seleccionar y elaborar una base de datos de los materiales más adecuados para realizar las obras de restauración.



3. ALCANCE

La investigación desarrollada, se definió de tipo mixto, ya que comprendió básicamente dos etapas: una etapa de investigación descriptiva, y otra de investigación experimental.

El principal objetivo de la investigación fue el de realizar un estudio comparativo entre los materiales de construcción usados para la construcción original de edificaciones de tipología colonial en el centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias (Bolívar, Colombia) y los materiales usados recientemente en los procesos de restauración de tales edificaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo necesario plantear una primera etapa de indagación profunda sobre los materiales que fueron objeto de estudio, sus propiedades principales y los métodos de ensayo que se aplican para cada uno de ellos. Luego en la segunda etapa se ejecutaron los ensayos tanto destructivos como no destructivos, con los cuales se determinaron las propiedades de cada uno de los materiales para así establecer si son adecuados para su uso en los procesos de restauración.

Se realizaron ensayos para determinar gravedad específica, porosidad, resistencia a la compresión y dureza (la cual se evaluó de forma indirecta por medio del ensayo de desgaste en Máquina de los Ángeles) en ladrillos; la resistencia a la compresión en morteros (argamasa); por otro lado, para las maderas se determinaron las anteriores propiedades excluyendo la resistencia a la compresión, ya que resulta más interesante el análisis de la resistencia a flexión y cortante de los elementos estructurales en este material.

3.1. Delimitación espacial

Se planteó extraer los materiales antiguos de dos edificaciones de tipología colonial ubicadas en el centro histórico de la ciudad de Cartagena que se encuentren actualmente en procesos de restauración. Tales edificaciones son las siguientes: Palacio de la Proclamación, antigua sede de la Gobernación de Bolívar; y el edificio Obra Pía, ubicado en la Calle 30 N° 9-47.



Figura 2. Ubicación de la edificación de tipo colonial que fue objeto de estudio.

Fuente: Google Earth.

Sin embargo, debido a que en el transcurso de la investigación se presentó el inconveniente de que se habían terminado los estudios realizados en el proceso de restauración del Palacio de la Proclamación, no ha sido posible ingresar a este recinto, a pesar de haber realizado el trámite para ello mediante el envío de una carta a la Secretaria de Infraestructura de la Gobernación, de la cual aún no se ha obtenido respuesta. Por lo anterior, no ha sido posible obtener los materiales previstos para este caso de estudio.

De igual forma con el apoyo del director de la investigación para el presente trabajo de grado, se llegó a la conclusión de que se puede adelantar el proceso con un solo caso de estudio, ya que se cumple con el objetivo principal de realizar un análisis comparativo de los materiales antiguos con los materiales nuevos.

Los materiales nuevos se extrajeron de canteras y/o fuentes de distribución cercanas a la ciudad de Cartagena, los cuales se escogieron a partir de una encuesta con ciertos arquitectos e ingenieros civiles involucrados en los procesos de restauración de edificaciones antiguas



en la ciudad. Teniendo en cuenta los diferentes materiales que son objeto de estudio, se escogieron varias fuentes de distribución. Para el ladrillo, se estudió la Ladrillera Bayunca, y la fuente de la Ferretería Antioquia, que distribuye ladrillos provenientes de Cúcuta. Para la madera se estudiaron las siguientes fuentes: Maderas Carrillo, ubicada en la Avenida Pedro de Heredia; y el material proporcionado por Yadira Paternina. Para el mortero o argamasa, se estudió el desempeño de la Cal Nare, y la Cal distribuida por la Ferretería Antioquia.

Los ensayos de los materiales se realizaron en las instalaciones de laboratorios de la Universidad de Cartagena, Campus Piedra de Bolívar, y en el laboratorio del Ing. Modesto Barrios, docente del programa de ingeniería civil de la Universidad de Cartagena.

3.2. Delimitación temporal

El desarrollo de la investigación correspondiente al presente trabajo de grado se realizó en el segundo período académico del año 2014, entre los meses de Julio y Octubre.

3.3. Producto final a entregar y productos complementarios

Luego de realizar el trabajo de investigación, se presentó el informe final en el cual se especificaron los resultados obtenidos de la aplicación de los ensayos de laboratorio a los materiales estudiados, además, se presentó el análisis y conclusiones que surgieron sobre las características observadas para los materiales y sobre cuáles son las canteras y fuentes de suministro que ofrecen los materiales con las características más apropiadas para ser usados en los procesos de restauración de los casos de estudio planteados.

Con el desarrollo de esta investigación, fue posible conocer las características y por ende la calidad que ofrecen los materiales de las canteras y fuentes de distribución estudiadas, esto proporciona bases para otras investigaciones que pudieran llevarse a cabo en esta área más adelante, y puede ser de ayuda para evaluar en un futuro las condiciones de la calidad de los materiales analizados actualmente y así compararla con los resultados que se obtuvieron en



esta investigación. Además, futuras investigaciones podrían enfocarse en el análisis de otros materiales que también se usen en procesos de restauración, tomando como referencia los procedimientos de experimentación y análisis de resultados que se llevaron a cabo en esta investigación. Por otro lado, la información obtenida puede ser de gran utilidad para ser tomada en cuenta por arquitectos e ingenieros restauradores para futuros procesos de restauración que se lleven a cabo en la ciudad.

3.4. Aspectos que no incluye la investigación

El análisis de las características de los materiales a estudiar en el presente trabajo de investigación, se limita sólo a las propiedades físicas y mecánicas anteriormente mencionadas, sin tener en cuenta la relación que éstas puedan tener con otros aspectos como la composición química interna de los materiales.



4. METODOLOGIA

El proyecto se planteó como una investigación de tipo mixto, puesto que comprende un ámbito descriptivo y otro experimental, debido a que se realizaron ensayos experimentales con el fin de obtener datos cuantitativos que permitieran, mediante los análisis y procedimientos respectivos, caracterizar y determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales escogidos (ladrillo, madera y mortero), tanto de los materiales originales de las casas coloniales y republicanas, como aquellos que son utilizados para su restauración; esto fue con el fin de darle cumplimiento a los objetivos previamente trazados, y dar una respuesta a la pregunta de investigación propuesta.

En la investigación de este proyecto se ha propuesto una metodología que básicamente se planteó en cinco fases: recopilación y análisis de información existente, lugar y materiales de estudio, realización de los ensayos pertinentes, análisis de resultados obtenidos y en última instancia la preparación del informe final.

A continuación se describirán cada una de las fases planteadas con el que se desarrolló el proyecto de investigación.

4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

La primera fase de la investigación consistió en la búsqueda, recopilación y análisis de la información relativa al tema de estudio. Ésta se basó principalmente en tres aspectos importantes:

- Estudio y análisis de algunos trabajos de investigación relacionados con el estudio de las técnicas y materiales implementados para los procesos de restauración de construcciones antiguas en la ciudad de Cartagena. Por otro lado, los estudios de tipo científico de los materiales asociados con el aspecto de restauración arquitectónica, acerca de sus propiedades y características.



- La consulta de las normativas que reglamentan y estipulan las especificaciones y los procedimientos a tener en cuenta para efectuar los ensayos necesarios para el desarrollo de la investigación.
- La investigación a través de encuestas y entrevistas a los arquitectos restauradores, con el fin de aprender y conocer, acerca de aspectos fundamentales de restauración como técnicas, procesos y lugares de adquisición de los materiales actuales.

4.2. LUGAR Y MATERIALES DE ESTUDIO

La segunda fase se llevó a cabo con ayuda de arquitectos especializados y con experiencia en la restauración, ésta se basa en los siguientes aspectos:

4.2.1. Identificación de los Lugares de Estudio.

Para establecer los lugares de estudio, fue de suma importancia localizar las edificaciones en las cuales se estaba restaurando o se fuera a restaurar; esto se desarrolló con ayuda de arquitectos que tienen conocimiento y/o están relacionados directamente con la restauración de las casas de tipología Colonial y Republicana de la ciudad de Cartagena.

En primera instancia se consideró realizar los estudios de materiales antiguos provenientes de dos casas o edificaciones, como se expresó en el alcance, las cuales eran el Palacio de la Proclamación (antigua sede de la Gobernación de Bolívar) y Obra Pía.

En el desarrollo de la investigación se presentó el inconveniente de que no se autorizó el ingreso al Palacio de la Proclamación, a pesar de haber agotado las instancias posibles para conseguir tal fin. Lo anterior supone una limitación para la investigación, más sin embargo, se consideró que se podría continuar la misma con un solo caso de estudio ya que aun así se cumple con el objetivo principal que es el de realizar un análisis comparativo entre los materiales nuevos y antiguos. Teniendo en cuenta esto, sólo se considerarán los materiales antiguos provenientes de la edificación Obra Pía para la realización de los ensayos pertinentes.



4.2.2. Identificación de los Lugares donde se adquieren los Materiales actuales de Restauración.

En este aspecto fue de vital importancia conocer por medio de los arquitectos restauradores la procedencia o lugar de donde son conseguidos los materiales de restauración, de esta forma se pudo establecer los puntos de distribución para luego adquirirlos.

4.2.3. Recolección de los Materiales de Estudio.

Los materiales de estudio fueron el ladrillo, la madera y el mortero, la obtención de éstos se dio primeramente, en el lugar de estudio, ya que son el material original de la edificación. Y segundo, en los lugares establecidos anteriormente como puntos de distribución principales para los arquitectos al momento de restaurar.

4.3. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS PERTINENTES

Esta tercera fase se contempló la realización de los ensayos destructivos y no destructivos que se requirieron para el desarrollo de la investigación.

4.3.1. Ensayos No Destructivos

Estos ensayos fueron realizados en el sitio de estudio; en un principio se había planteado llevarlos a cabo por medio del esclerómetro o martillo de Schmidt y de métodos ultrasónicos para evaluar las condiciones de resistencia a la compresión de los materiales antiguos en las construcciones coloniales, sin embargo, con la ayuda del director del presente trabajo de grado se decidió no efectuar las pruebas con los métodos ultrasónicos debido a que se estimó que los ensayos de resistencia a la compresión en el laboratorio (ensayos destructivos) proporcionarían resultados más confiables y se podrían comparar con los resultados obtenidos con el esclerómetro. La razón de ser de éstos ensayos no destructivos es la de no afectar la estructura a la cual se está estudiando.

El tamaño de la muestra para estos ensayos fue de acuerdo a la cantidad pertinente que se requiriera, en este caso se estableció que por cada ensayo se le realizaran 7 pruebas, como se observa en la siguiente tabla:



Tabla 1. Número Total de Muestras de cada material de ensayos No Destructivos.

Material	Cantidad De Estudios	N° De Ensayos	N° De Pruebas Por Ensayo	Total N° De muestras
Ladrillo de Arcilla	1	1	7	7
Madera Estructural	1	1	7	7
Mortero	1	1	7	7

Fuente: Autores.

4.3.2. Ensayos Destructivos

Estos ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Cartagena, dotados de los implementos necesarios para su elaboración, los ensayos destructivos de los materiales antiguos se realizaron con muestras extraídas del caso de estudio que corresponda. Se realizaron pruebas para determinar algunas propiedades mecánicas y físicas. Cabe aclarar que el ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en el laboratorio del Ing. Modesto Barrios, debido a que la maquina utilizada en la universidad se encontraba deteriorada.

Se tuvo una limitación en cuanto a la realización del ensayo de dureza debido a que no se pudo adaptar el ensayo con los equipos con los que cuenta el laboratorio de la Universidad, motivo por el cual se realizó este mismo por medio del ensayo de desgaste (en Máquina de los Ángeles), debido a que esta propiedad depende de la dureza del material.

Debido a que eran ensayos destructivos, el tamaño de la muestra fue de acuerdo al número de ensayos realizados por cada material. En este trabajo se realizaron por lo menos 7 pruebas a cada material, esto con el fin de que los datos obtenidos fueran lo más exactos posibles. El número total de muestras de cada material sería el siguiente:



Tabla 2. Número Total de Muestras de Ladrillo de Arcilla.

Ladrillo de Arcilla				
Material	Cantidad De Estudios	N° De Ensayos	N° De Pruebas Por Ensayo	Total N° De muestras
Material Original	1	4	7	28
Material Actual	2	4	7	56
			TOTAL	84

Fuente: Autores.

Tabla 3. Número Total de Muestras de la Madera.

Madera				
Material	Cantidad De Estudios	N° De Ensayos	N° De Pruebas Por Ensayo	Total N° De muestras
Material Original	1	3	7	21
Material Actual	2	3	7	42
			TOTAL	63

Fuente: Autores.

En la siguiente tabla se presenta el número total de Muestras del mortero, cabe aclarar que para el material actual se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días de fabricar la muestra (ICONTEC, 2004), y la relación utilizada se estableció de acuerdo a los conocimientos y experiencia de Rosa Martínez, una arquitecta experta en el tema de restauración; la relación fue de 1:2:1 (Cal, Arena y Cemento).

Tabla 4. Número Total de Muestras de Mortero.

Mortero				
Material	Cantidad De Estudios	N° De Ensayos	N° De Pruebas Por Ensayo	Total N° De muestras
Material Original	1	1	7	7
Material Actual	2	3	7	42
			TOTAL	49

Fuente: Autores.



4.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Teniendo como base los datos obtenidos en la fase anterior, se procedió a efectuar el estudio de los mismos; se utilizaron herramientas importantes de Microsoft Office como Excel y Word para facilitar el desarrollo de todo el proyecto. En esta fase se analizaron los datos obtenidos de cada material (características y propiedades físicas y mecánicas), con base en este análisis se realizó un estudio comparativo que permitiera establecer si los materiales utilizados actualmente por los restauradores son apropiados y cuentan con las características y propiedades necesarias para reemplazar los materiales originales de la edificación que se encuentran deteriorados.

4.5. PREPARACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL INFORME FINAL

Luego de haber llevado a cabo cada uno de los anteriores pasos, desarrollar los objetivos propuestos y de llegar a una conclusión sobre la solución del interrogante planteado para el desarrollo de esta investigación, se procedió a preparar el informe final, donde se expusieron todos los resultados obtenidos al final de este proceso investigativo, además de todos los detalles importantes que conciernen al mismo.



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de llevar a cabo los ensayos de laboratorio pertinentes se obtuvieron los resultados que se consignan a continuación, tales resultados se organizaron según el material que fue ensayado.

5.1. ENSAYOS CON LADRILLOS

5.1.1. Resistencia a la compresión por esclerómetro o martillo de Schmidt

Los siguientes son los resultados correspondientes al ensayo de resistencia a la compresión de ladrillos mediante el uso del esclerómetro, este ensayo sólo se consideró para ladrillos antiguos presentes en la edificación que es caso de estudio. El ensayo se realizó tomando 10 puntos (en lugar de sólo 7, para obtener mejores resultados) a cero grados (0°), en una zona determinada de mampostería en la edificación denominada como Obra Pía. Por recomendación del docente William Villa, se tomaron las lecturas para luego realizar un promedio con el cual se obtuvo el valor de la resistencia a la compresión correspondiente por interpolación, teniendo en cuenta la correlación del equipo.

Tabla 5. Lecturas de rebotes registradas en el esclerómetro, según cada punto ensayado.

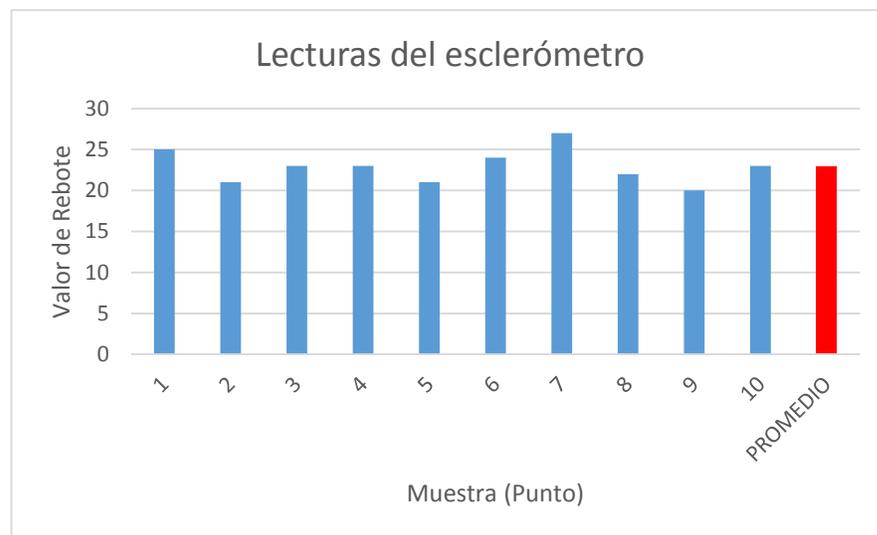
Muestra(Punto)	Lectura
1	25
2	21
3	23
4	23
5	21
6	24
7	27
8	22
9	20
10	23
PROMEDIO	22.9

Fuente: Autores.

A partir de los datos anteriores se puede inferir lo siguiente:

- El promedio de lecturas del valor del rebote del esclerómetro corresponde a 22,9.
- El 60% de los valores de las lecturas registradas se encuentran por encima del promedio.
- El 40% de los valores de las lecturas registradas se encuentran por debajo del promedio.

Gráfico 1. Lecturas de rebotes obtenidas mediante el uso del esclerómetro.



Fuente: Autores.

Con el promedio obtenido, se calcula la resistencia a la compresión de los ladrillos, mediante interpolación, conociendo los valores de resistencia correspondientes para lecturas de 22 y 23.

Tabla 6. Resistencia a la compresión obtenida para el ladrillo antiguo presente en Obra Pía.

Lectura	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
22	110
22.9	119
23	120

Fuente: Autores.

A partir de lo anterior se infiere que el valor de resistencia a la compresión de los ladrillos es de **119 Kg/cm²**, sin embargo este valor se usará como un estimativo y se comparará con los resultados que se obtengan de los ensayos de resistencia a la compresión mediante el uso de la máquina universal.

Por otro lado, cabe anotar que dentro de la bibliografía y los estudios consultados, no existen referencias de la evaluación de la resistencia a la compresión de ladrillos mediante el uso del esclerómetro, obteniéndose los resultados de resistencia a la compresión de este material a través de ensayos destructivos.

Figura 3. Realización de pruebas de esclerómetro en Obra Pía.



Fuente: Autores.

5.1.2. Ensayo de Resistencia a la Compresión con la Máquina Universal

El ensayo fue realizado para las muestras de ladrillos adquiridos en la Ladrillera Bayunca y en la Ferretería Antioquia, y para las muestras de ladrillos antiguos extraídos de la Obra Pía. Este ensayo se realizó con la máquina Universal, en el laboratorio del Ing. Modesto Barrios; para este caso, se observó detenidamente el material, con el fin de establecer el momento



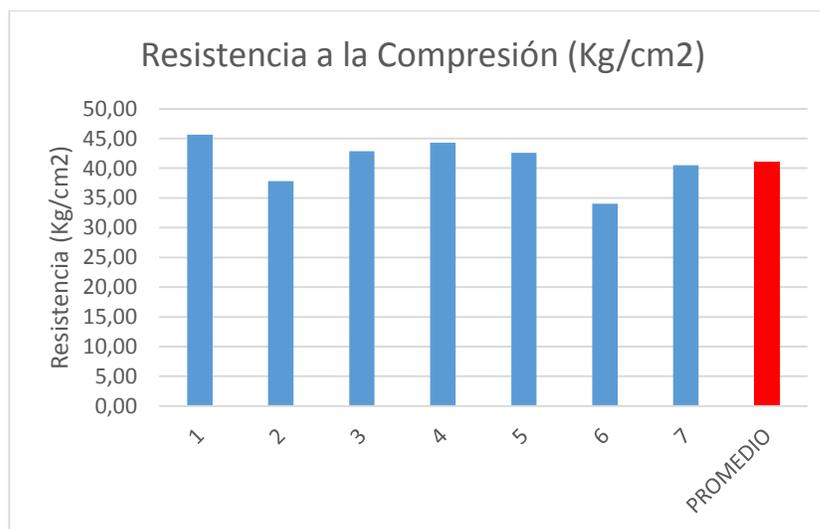
exacto o aproximado en que el material tuvo fisuras, y de este modo tomar la lectura de cada muestra. El ensayo fue realizado a 7 muestras por cada lugar de estudio, como se tenía previsto. A continuación se observan los resultados obtenidos por cada tipo de ladrillo.

Tabla 7. Resistencia a la compresión del ladrillo antiguo presente en Obra Pía.

Ladrillos antiguos (Obra Pía)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm²)	Resistencia (Kg/Cm²)
1	201,3	450	45,65
2	166,8	450	37,82
3	189,1	450	42,88
4	195,3	450	44,29
5	187,9	450	42,61
6	150,1	450	34,04
7	178,6	450	40,50
PROMEDIO	181,3	450	41,1

Fuente: Autores.

Gráfico 2. Resultados obtenidos de Obra Pía.



Fuente: Autores.

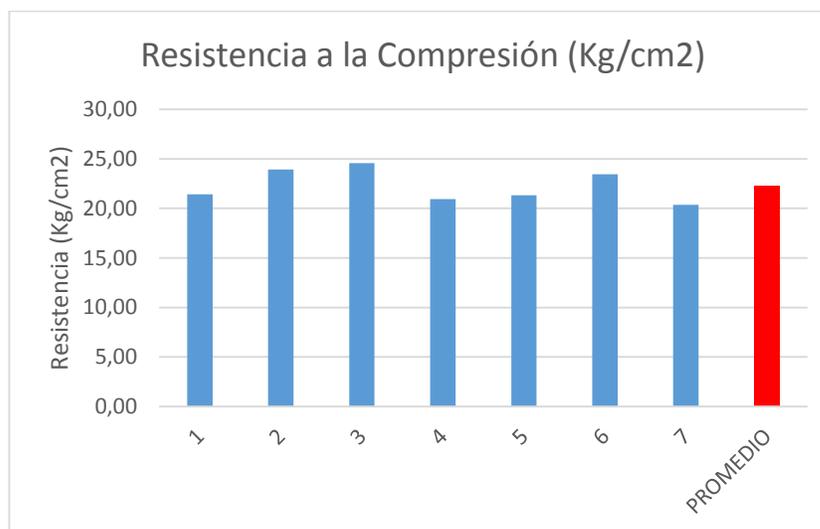


Tabla 8. Resistencia a la compresión del ladrillo Nuevo de la Ferretería Antioquia.

Ladrillos Nuevos (Ferretería Antioquia)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	94,5	450	21,43
2	105,5	450	23,92
3	108,3	450	24,56
4	92,4	450	20,95
5	94,1	450	21,34
6	103,4	450	23,45
7	89,8	450	20,36
PROMEDIO	98,3	450	22,3

Fuente: Autores.

Gráfico 3. Resultados obtenidos de Ferretería Antioquia.

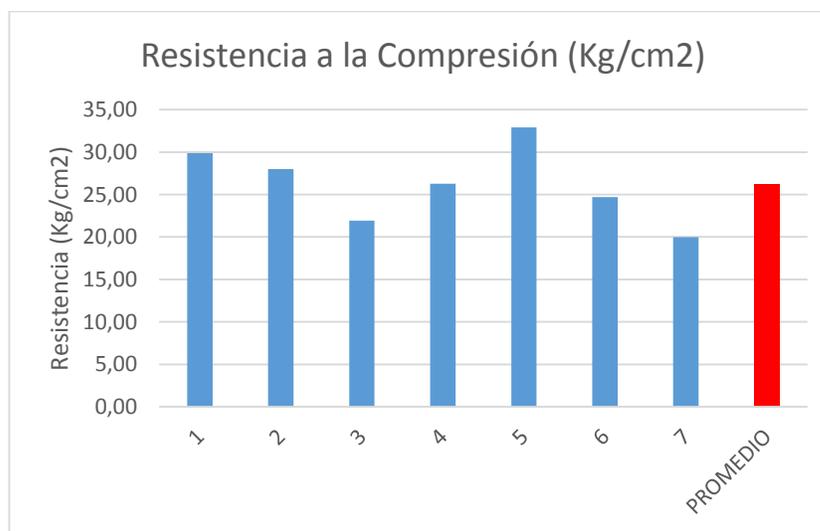


Fuente: Autores.

Tabla 9. Resistencia a la compresión del ladrillo Nuevo de la Ladrillera Bayunca.

Ladrillos Nuevos (Ladrillera Bayunca)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm²)	Resistencia (Kg/Cm²)
1	131,8	450	29,89
2	123,4	450	27,98
3	96,7	450	21,93
4	115,8	450	26,26
5	145,1	450	32,90
6	108,9	450	24,69
7	88,1	450	19,98
PROMEDIO	115,7	450	26,2

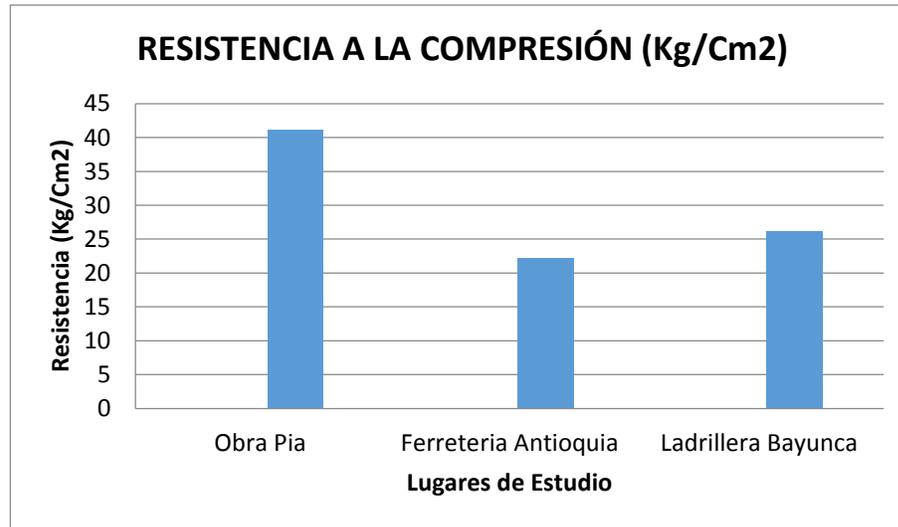
Fuente: Autores.

Gráfico 4. Resultados obtenidos de Ladrillera Bayunca.

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, realizados a través de la maquina universal, se obtuvo que para los ladrillos antiguos que presenta la Obra Pía, una resistencia promedio de 41,1 Kg/cm², para los ladrillos de la Ferretería Antioquia una resistencia de 22,3 Kg/cm² y por último la Ladrillera Bayunca una resistencia promedio de 26,2 Kg/cm² como se observa en el grafico gráfico 5.

Gráfico 5. Resultados obtenidos del promedio de cada Lugar de Estudio



Fuente: Autores.

En la comparación de los ladrillos antiguos con los ladrillos actuales, se observa una gran diferencia de resistencia a la compresión. Se observa que el ladrillo de Obra Pía es casi el doble de la resistencia que presenta el ladrillo de la Ferretería Antioquia.

Es importante anotar que, en los estudios existentes y descritos en esta investigación no se presentan ensayos de resistencia a la compresión a los ladrillos a través de la maquina universal específicamente y que además sea para edificaciones de tipo colonial y/o republicano. Lo expuesto por J. España y M. Tapia hace referencia a la determinación de ciertos parámetros que sirvieran de base para la caracterización y la normalización de estructuras de mampostería; por otro lado el estudio de M. Meza y J. Rhenals, se enfoca en los materiales para la restauración del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena, por lo cual el análisis de las condiciones de resistencia puede ser diferente para los materiales requeridos en la restauración de edificaciones.

Figura 4. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Ladrillo

Fuente: Autores.

5.1.3. Ensayo para determinar Gravedad Específica Bulk y Absorción

Este ensayo fue realizado en 7 muestras de ladrillos para determinar Gravedad Especifica Bulk, Gravedad Especifica Bulk Saturada con Superficie Seca, Gravedad Especifica Aparente y porcentaje de absorción. El ensayo fue realizado basándose en los lineamientos de la norma INVIAS INV E-223-07. A continuación se observan los resultados obtenidos para las muestras de ladrillos de la Obra Pía, y los nuevos adquiridos en la Ferretería Antioquia y en la Ladrillera Bayunca:

Tabla 10. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Obra Pía.

Ladrillos antiguos (Obra Pía)							
Muestra	Ms (gr)	Msat (gr)	Msumer (gr)	Gsb	Gsb sss	Gsa	%Absorción
1	704,6	763,54	337,54	1,65	1,79	1,92	8,37
2	680,2	741,29	334,14	1,67	1,82	1,97	8,98
3	469,9	513,91	238,10	1,70	1,86	2,03	9,37
4	399,1	433,87	198,30	1,69	1,84	1,99	8,71
5	356,9	388,33	179,06	1,71	1,86	2,01	8,81
6	298,5	325,31	152,44	1,73	1,88	2,04	8,98
7	232,5	254,09	122,36	1,76	1,93	2,11	9,29
PROMEDIO	448,8	488,6	223,1	1,7	1,9	2,0	8,9

Fuente: Autores.



Tabla 11. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Ferretería Antioquia.

Ladrillos Nuevos (Ferretería Antioquia)							
Muestra	Ms (gr)	Msat (gr)	Msumer (gr)	Gsb	Gsb sss	Gsa	%Absorción
1	1414,9	1642,36	762,7	1,61	1,87	2,17	16,08
2	1389,9	1614,13	749,30	1,61	1,87	2,17	16,13
3	1245,8	1451,41	672,06	1,60	1,86	2,17	16,50
4	1156,3	1350,35	624,08	1,59	1,86	2,17	16,78
5	959,5	1123,6	516,45	1,58	1,85	2,17	17,10
6	783,40	917,88	420,97	1,58	1,85	2,16	17,17
7	461,8	540,38	243,11	1,55	1,82	2,11	17,02
PROMEDIO	1058,8	1234,3	569,8	1,6	1,9	2,2	16,7

Fuente: Autores.

Tabla 12. Gravedad Especifica Bulk y Absorción de ladrillos de Ladrillera Bayunca.

Ladrillos Nuevos (Ladrillera Bayunca)							
Muestra	Ms (gr)	Msat (gr)	Msumer (gr)	Gsb	Gsb sss	Gsa	%Absorción
1	1353,8	1581,25	701,6	1,54	1,80	2,08	16,80
2	1328,8	1553,02	688,19	1,54	1,80	2,07	16,87
3	1184,7	1385,30	611,15	1,53	1,79	2,07	16,93
4	1105,2	1289,24	563,17	1,52	1,78	2,04	16,65
5	912,4	1062,5	455,34	1,50	1,75	2,00	16,45
6	862,30	996,77	471,86	1,64	1,90	2,21	15,59
7	470,7	551,22	252,02	1,57	1,84	2,15	17,11
PROMEDIO	1031,1	1202,8	534,8	1,5	1,8	2,1	16,6

Fuente: Autores.

Ms = Peso de la Muestra Seca

Msat = Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca

Msumer = Peso de la Muestra Sumergida

Gsb = Gravedad Especifica Bulk

Gsb sss = Gravedad Especifica Bulk Saturada con Superficie Seca

Gsa = Gravedad Especifica Aparente



Para este ensayo las muestras se tomaron de diferentes pesos y volúmenes; los resultados obtenidos reflejan que los ladrillos de la Ferretería Antioquia y la Ladrillera Bayunca tienen valores muy parecidos en todos los ensayos analizados. En el porcentaje de absorción los ladrillos antiguos de la Obra Pía presentan un promedio de 8,9%, mientras que la Ferretería Antioquia presenta 16,7% y la Ladrillera Bayunca 16,6%, por lo que se infiere que los ladrillos antiguos presentan menos porosidad y son más compactos.

Analizando los estudios descritos en esta investigación, se observa que el ladrillo fue estudiado y se realizaron ensayos que ayudaran a determinar sus características físicas y mecánicas de forma individual, sin embargo, cabe aclarar que el estudio de M. Meza y J. Rhenals, se basaba en los materiales para la restauración del cordón amurallado y no de las edificaciones de tipología colonial. Por otro lado J. España y M. Tapia realizaron estudios de mampostería, en donde se encuentran los materiales como el ladrillo y el mortero, que están directamente relacionados con esta investigación, pero que son analizados en conjunto (como muros) y utilizando varias combinaciones de argamasa (cal y arena) en distintas proporciones.

5.1.4. Ensayo de Permeabilidad

El ensayo se realizó basándose en la norma INV E-130-07; para este caso se tomó el bloque de ladrillo y se utilizó un extractor de núcleos para obtener el cilindro, de modo que se ajustara a las dimensiones del permeámetro. El diámetro del Ladrillo era menor del que presentaba el permeámetro, por lo que se optó en rodear de plastilina el cilindro con el fin de que el agua no se filtrara por los lados. El ensayo fue realizado en el laboratorio de la Universidad de Cartagena, para el Ladrillo de Obra Pía, de la Ferretería Antioquia y de la Ladrillera Bayunca, 7 muestras por cada tipo de ladrillo y 3 mediciones por cada muestra.

A continuación se presentan los datos y resultados del ensayo de permeabilidad:



Altura de Carga Constante (cm)	46,2
Diámetro (cm)	4,65
Área (cm²)	16,98
Longitud	5

Fuente: Autores.

Tabla 13. Permeabilidad de Ladrillos de Obra Pía

Ladrillo Antiguo (Obra Pía)				
Muestra	Medición	Tiempo (seg)	Vol. Agua (cm³)	Coficiente de permeabilidad (cm/seg)
1	1	7200	3,4	3,00939E-06
	2	7200	3,5	3,0979E-06
	3	7200	3,5	3,0979E-06
PROMEDIO				3,0684E-06
2	1	7200	3,1	2,74386E-06
	2	7200	3,3	2,92088E-06
	3	7200	3,4	3,00939E-06
PROMEDIO				2,89138E-06
3	1	7200	2,9	2,56683E-06
	2	7200	3,1	2,74386E-06
	3	7200	3,2	2,83237E-06
PROMEDIO				2,71435E-06
4	1	7200	3,6	3,18641E-06
	2	7200	3,7	3,27493E-06
	3	7200	3,7	3,27493E-06
PROMEDIO				3,24542E-06
5	1	3600	1,2	2,12428E-06
	2	3600	1,3	2,3013E-06
	3	3600	1,3	2,3013E-06
PROMEDIO				2,24229E-06
6	1	3600	1,4	2,47832E-06
	2	3600	1,5	2,65535E-06
	3	3600	1,6	2,83237E-06
PROMEDIO				2,65535E-06
7	1	3600	0,9	1,59321E-06
	2	3600	1,3	2,3013E-06
	3	3600	1,5	2,65535E-06
PROMEDIO				2,18328E-06
PROMEDIO TOTAL				2,71435E-06

Fuente: Autores.



Altura de Carga Constante (cm)	47,1
Diámetro (cm)	4,6
Área (cm²)	16,62
Longitud	5

Fuente: Autores.

Tabla 14. Permeabilidad de Ladrillos de la Ferretería Antioquia

Ladrillo Nuevo (Ferretería Antioquia)				
Muestra	Medición	Tiempo (seg)	Vol. Agua (cm³)	Coefficiente de permeabilidad (cm/seg)
1	1	7200	4,4	3,90359E-06
	2	7200	4,4	3,89451E-06
	3	7200	4,5	3,98302E-06
PROMEDIO				3,92704E-06
2	1	7200	4,5	3,98302E-06
	2	7200	4,6	4,07153E-06
	3	7200	4,7	4,16004E-06
PROMEDIO				4,07153E-06
3	1	7200	4,3	3,80599E-06
	2	7200	4,5	3,98302E-06
	3	7200	4,5	3,98302E-06
PROMEDIO				3,92401E-06
4	1	7200	4,3	3,80599E-06
	2	7200	4,3	3,80599E-06
	3	7200	4,3	3,80599E-06
PROMEDIO				3,80599E-06
5	1	3600	2,2	3,89451E-06
	2	3600	2,2	3,89451E-06
	3	3600	2,3	4,07153E-06
PROMEDIO				3,95351E-06
6	1	3600	2,4	4,24855E-06
	2	3600	2,4	4,24855E-06
	3	3600	2,4	4,24855E-06
PROMEDIO				4,24855E-06
7	1	3600	2	3,54046E-06
	2	3600	2,3	4,07153E-06
	3	3600	2,4	4,24855E-06
PROMEDIO				3,95351E-06
PROMEDIO TOTAL				3,98345E-06

Fuente: Autores.



Altura de Carga Constante (cm)	45,4
Diámetro (cm)	4,7
Área (cm²)	17,35
Longitud	5

Fuente: Autores.

Tabla 15. Permeabilidad de Ladrillos de la Ladrillera Bayunca.

Ladrillo Nuevo (Ladrillera Bayunca)				
Muestra	Medición	Tiempo (seg)	Vol. Agua (cm³)	Coefficiente de permeabilidad (cm/seg)
1	1	7200	4,1	3,61476E-06
	2	7200	4,2	3,70293E-06
	3	7200	4,3	3,79109E-06
PROMEDIO				3,70293E-06
2	1	7200	4	3,5266E-06
	2	7200	4,1	3,61476E-06
	3	7200	4,1	3,61476E-06
PROMEDIO				3,58538E-06
3	1	7200	3,9	3,43843E-06
	2	7200	4	3,5266E-06
	3	7200	4	3,5266E-06
PROMEDIO				3,49721E-06
4	1	7200	4,2	3,70293E-06
	2	7200	4,2	3,70293E-06
	3	7200	4,3	3,79109E-06
PROMEDIO				3,73232E-06
5	1	3600	1,9	3,35027E-06
	2	3600	2	3,5266E-06
	3	3600	2	3,5266E-06
PROMEDIO				3,46782E-06
6	1	3600	2,1	3,70293E-06
	2	3600	2,2	3,87926E-06
	3	3600	2,2	3,87926E-06
PROMEDIO				3,82048E-06
7	1	3600	2	3,5266E-06
	2	3600	2,1	3,70293E-06
	3	3600	2,3	4,05559E-06
PROMEDIO				3,76171E-06
PROMEDIO TOTAL				3,65255E-06

Fuente: Autores.



Analizando los resultados obtenidos de permeabilidad en los ladrillos de la Obra Pía, los adquiridos en la Ferretería Antioquia y la ladrillera Bayunca, se pudo observar que ninguno presenta alta permeabilidad. Cabe anotar que de acuerdo a los resultados promedios de cada uno, el de mayor permeabilidad fue el ladrillo de la Ferretería Antioquia con un valor de $3,98345E-06$ cm/seg, le sigue el ladrillo de la Ladrillera Bayunca con $3,65255E-06$ cm/seg y por último el ladrillo de la Obra Pía con $2,71435E-06$ cm/seg. La permeabilidad depende de la distribución del tamaño de los poros, por lo que de acuerdo a los resultados se constata que el ladrillo de Obra Pía es el menos poroso de todos, con un 32% menos de permeabilidad, con respecto al ladrillo de la Ferretería Antioquia.

Teniendo en cuenta los estudios expuestos al principio de esta investigación, se observa que el ensayo de permeabilidad no fue realizado a ladrillos, pero si se analizó la porosidad que se encuentra directamente relacionado. Tal como se ha mencionado anteriormente, los estudios expuestos se enfocan en estructuras de mampostería y/o en materiales utilizados para el cordón amurallado.

Figura 5. Ensayo de Permeabilidad del Ladrillo



Fuente: Autores.



5.1.5. Ensayo de desgaste por medio de la Máquina de Los Ángeles

Se realizó el ensayo de desgaste para las muestras de ladrillos antiguos, y los nuevos adquiridos en la Ladrillera Bayunca y en la Ferretería Antioquia. El ensayo de desgaste se realizó siguiendo los lineamientos de la norma INVIAS INV E-219-07, y bajo las siguientes condiciones:

Tabla 16. Condiciones de realización del ensayo de desgaste.

Gradación	E
N° de revoluciones	1000
Peso inicial de material (g)	10000
N° de esferas	12

Fuente: Autores.

Cabe aclarar que el ensayo se realizó en dos ocasiones para cada tipo de ladrillo a evaluar, debido a la cantidad de material necesario para cumplir con las condiciones de peso inicial de material de la gradación seleccionada.

Para obtener el valor de desgaste, se pesa el material que se retiene en el tamiz N° 12, luego de pasar por la Máquina de Los Ángeles. Los resultados obtenidos se consignan en las siguientes tablas:

Tabla 17. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos antiguos (Obra Pía).

Ladrillos antiguos (Obra Pía)			
Ensayo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Desgaste (%)
1	10000	3789.00	62.11
2	10000	3822.70	61.77
Promedio	10000	3805.85	61.94

Fuente: Autores.

Tabla 18. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos nuevos (Ladrillera Bayunca).

Ladrillos nuevos (Ladrillera Bayunca)			
Ensayo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Desgaste (%)
1	10000	2057.00	79.43
2	10000	1982.30	80.18
Promedio	10000	2019.65	79.80

Fuente: Autores.

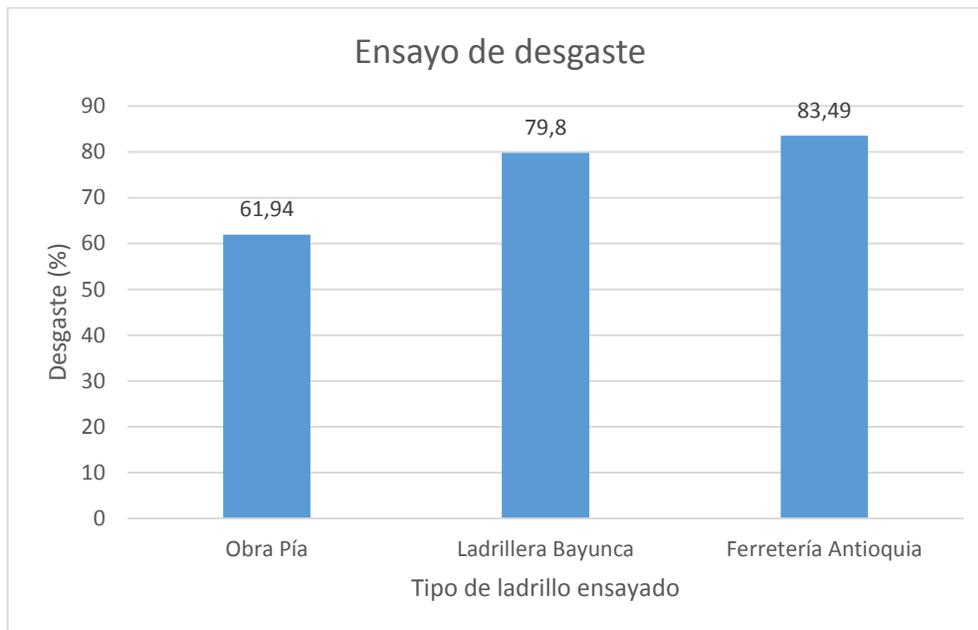
Tabla 19. Resultados del ensayo de desgaste para los ladrillos nuevos (Ferretería Antioquia).

Ladrillos nuevos (Ferretería Antioquia)			
Ensayo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Desgaste (%)
1	10000	1578.10	84.22
2	10000	1724.40	82.76
Promedio	10000	1651.25	83.49

Fuente: Autores.

Con los anteriores datos, se muestra a continuación un gráfico con los valores promedio de desgaste para cada tipo de ladrillo ensayado:

Gráfico 6. Valores promedio de desgaste para cada tipo de ladrillo ensayado.



Fuente: Autores.

Figura 6. Colocación de la muestra de ladrillo a ensayar dentro de la Máquina de los Ángeles.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede inferir lo siguiente:

- Los ladrillos antiguos presentes en la edificación Obra Pía registran los valores más bajos de desgaste (61.94%) con respecto a los dos tipos de ladrillos nuevos que fueron ensayados.
- De los ladrillos nuevos que fueron ensayados, los que presentan menor desgaste son los adquiridos en la Ladrillera Bayunca con un valor de desgaste de 79.80%, con respecto al desgaste de 83.49% correspondiente a los ladrillos de la Ferretería Antioquia.
- Con los porcentajes de desgaste obtenidos se infiere que los ladrillos antiguos de Obra Pía son los que registran mayor dureza, seguidos de los de Ladrillera Bayunca y en último lugar los de Ferretería Antioquia.

Por otro lado, es necesario aclarar que no se tienen referencias del comportamiento del ladrillo en ensayos de desgaste en la Máquina de los Ángeles, por lo cual es útil realizar este tipo de ensayos que permitan obtener información adicional de las propiedades del ladrillo. Ahora, teniendo en cuenta trabajos como el de Meza y Cohen (2011), en el cual los resultados de desgaste para piedras calizas oscilan entre 37.2% y 53.74%, se puede inferir que los ladrillos ensayados poseen porcentajes de desgaste elevados con respecto a los de piedra caliza, y por lo tanto poseen menor dureza.



5.2. ENSAYOS CON MADERAS

5.2.1. Densidad o peso específico aparente

Para la realización del ensayo de determinación del peso específico aparente para las maderas, se utilizó la norma NTC 290. Se ensayaron probetas de madera Guayacán con una sección transversal de 3cm x 3cm y una longitud de 10 cm, las cuales se obtuvieron de la edificación Obra Pía, de Maderas Carrillo y de la distribuidora de la señora Yadira Paternina.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de determinación del peso específico aparente para las maderas en estudio.

Tabla 20. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera antiguas (Obra Pía).

Madera antigua (Obra Pía)							
Muestra	Pv (g)	Pa (g)	Vv (cm ³)	Va (cm ³)	PEAv (g/cm ³)	PEAa (g/cm ³)	PEAb (g/cm ³)
1	101.2	93.1	90	86.8	1.12	1.07	1.03
2	98.5	92.4	90	86.2	1.09	1.07	1.03
3	96.7	89.5	90	85.6	1.07	1.05	0.99
4	99.1	91.4	90	86.3	1.10	1.06	1.02
5	104.6	95.1	90	87.2	1.16	1.09	1.06
6	94.2	83.4	90	84.2	1.05	0.99	0.93
7	102.4	91.2	90	86.1	1.14	1.06	1.01
Promedio	99.53	90.87	90.00	86.06	1.11	1.06	1.01

Fuente: Autores.

Donde:

- **Pv:** Peso de la probeta en estado verde (Contenido de Humedad > 30%).
- **Pa:** Peso de la probeta en estado anhidro (Contenido de Humedad = 0%).
- **Vv:** Volumen de la probeta en estado verde.
- **Va:** Peso de la probeta en estado anhidro.
- **PEAv:** Peso específico aparente en estado verde.
- **PEAa:** Peso específico aparente en estado anhidro.
- **PEAb:** Peso específico aparente básico.



Tabla 21. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).

Madera nueva (Yadira Paternina)							
Muestra	Pv (g)	Pa (g)	Vv (cm3)	Va (cm3)	PEAv (g/cm3)	PEAa (g/cm3)	PEAb (g/cm3)
1	115.2	104.7	90	88.6	1.28	1.18	1.16
2	108.9	99.5	90	86.2	1.21	1.15	1.11
3	112.3	103.8	90	88.3	1.25	1.18	1.15
4	111.8	103.4	90	88	1.24	1.18	1.15
5	116.4	108.3	90	89.3	1.29	1.21	1.20
6	109.2	101.2	90	87.1	1.21	1.16	1.12
7	111.6	102.7	90	87.5	1.24	1.17	1.14
Promedio	112.20	103.37	90.00	87.86	1.25	1.18	1.15

Fuente: Autores.

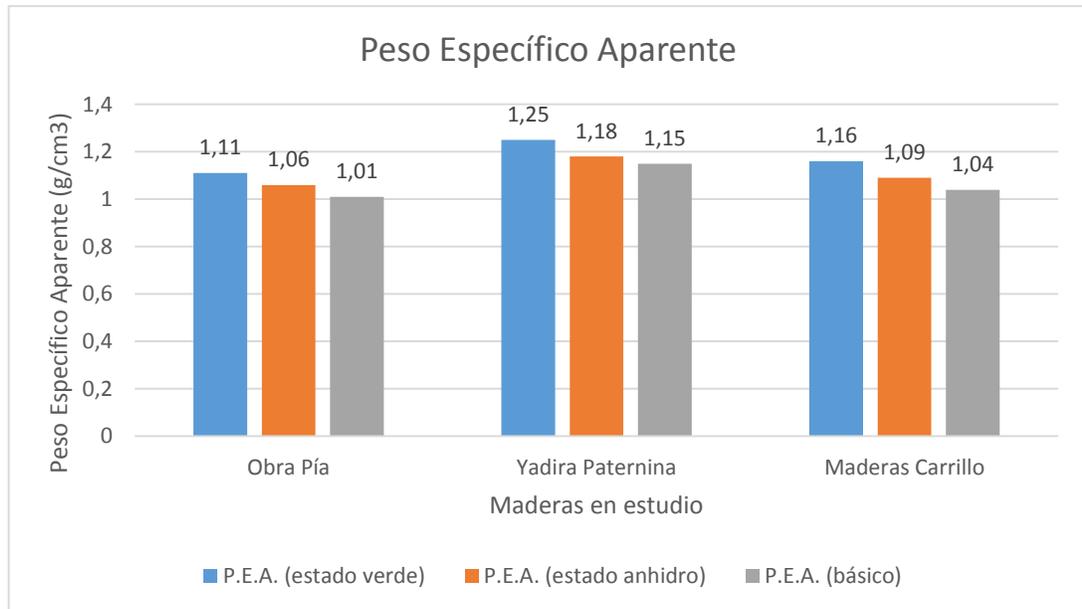
Tabla 22. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).

Madera nueva (Maderas Carrillo)							
Muestra	Pv (g)	Pa (g)	Vv (cm3)	Va (cm3)	PEAv (g/cm3)	PEAa (g/cm3)	PEAb (g/cm3)
1	106.2	95.2	90	87.1	1.18	1.09	1.06
2	104.1	94.1	90	86.4	1.16	1.09	1.05
3	103.8	92.5	90	86	1.15	1.08	1.03
4	108.5	97.3	90	87.5	1.21	1.11	1.08
5	102.3	92.1	90	86	1.14	1.07	1.02
6	101.7	91.6	90	85.3	1.13	1.07	1.02
7	105.4	94.2	90	86.8	1.17	1.09	1.05
Promedio	104.57	93.86	90.00	86.44	1.16	1.09	1.04

Fuente: Autores.

En el siguiente gráfico se presentan los resultados de los valores promedio para peso específico aparente, correspondientes a cada una de las maderas en estudio:

Gráfico 7. Peso específico aparente en estado verde, anhidro y básico, de las muestras de madera en estudio.



Fuente: Autores.

Figura 7. Probetas para el ensayo de Peso Específico Aparente en maderas, obtenidas por medio de Yadira Paternina.



Fuente: Autores.



De lo anteriormente expuesto es posible inferir:

- La madera extraída de la edificación Obra Pía registra los valores de P.E.A. en estado verde, anhidro y básico más bajos (1.11 g/cm³, 1.06 g/cm³, 1.01 g/cm³).
- De las maderas nuevas ensayadas, la que presenta los mejores resultados es la adquirida en la distribuidora de Yadira Paternina, con una diferencia porcentual de 6.80%, 7.71% y 9.20% con respecto a los resultados obtenidos (de P.E.A. en estado verde, anhidro y básico) para la de Maderas Carrillo.
- Por lo anterior, se infiere que la madera de mejor calidad para utilizar en el proceso de restauración es la de Yadira Paternina.

Por otro lado, teniendo en cuenta lo expuesto por Ayola y Matute (2013), se hace referencia a la gravedad específica de varias especies de maderas, entre ellas la de Guayacán. Si bien la gravedad específica no es igual al peso específico, ya que la gravedad específica es una magnitud adimensional, ésta puede servir de referencia, dado el hecho de que el procedimiento experimental para ambos es similar. En el trabajo de Ayola y Matute (2013), se obtuvo una gravedad específica promedio de 1.22; la cual se asemeja al valor obtenido para el peso específico aparente en estado verde de la madera de Yadira Paternina, lo cual puede indicar cierta coherencia con los ensayos desarrollados en el presente trabajo de grado.

5.2.2. Ensayo de resistencia a la flexión

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma NTC663, usando muestras de madera Guayacán. Se usaron siete probetas para cada tipo de madera analizada según la fuente de la cual se obtuvo. Las dimensiones de las probetas son las siguientes: 2 x 2 x 45 cm. Los resultados obtenidos para esta prueba son los siguientes:



Tabla 23. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera antiguas (Obra Pía).

Obra Pía		
Muestra	Carga Máx (N)	Esfuerzo Máx (Kg/cm²)
1	127.52	860.76
2	138.75	936.56
3	125.81	849.22
4	142.34	960.80
5	132.40	893.70
6	143.65	969.64
7	137.48	927.99
PROMEDIO	135.42	914.09

Fuente: Autores.

Tabla 24. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).

Yadira Paternina		
Muestra	Carga Máx (N)	Esfuerzo Máx (Kg/cm²)
1	164.25	1108.69
2	155.15	1047.26
3	175.24	1182.87
4	170.85	1153.24
5	168.32	1136.16
6	159.51	1076.69
7	161.36	1089.18
PROMEDIO	164.95	1113.44

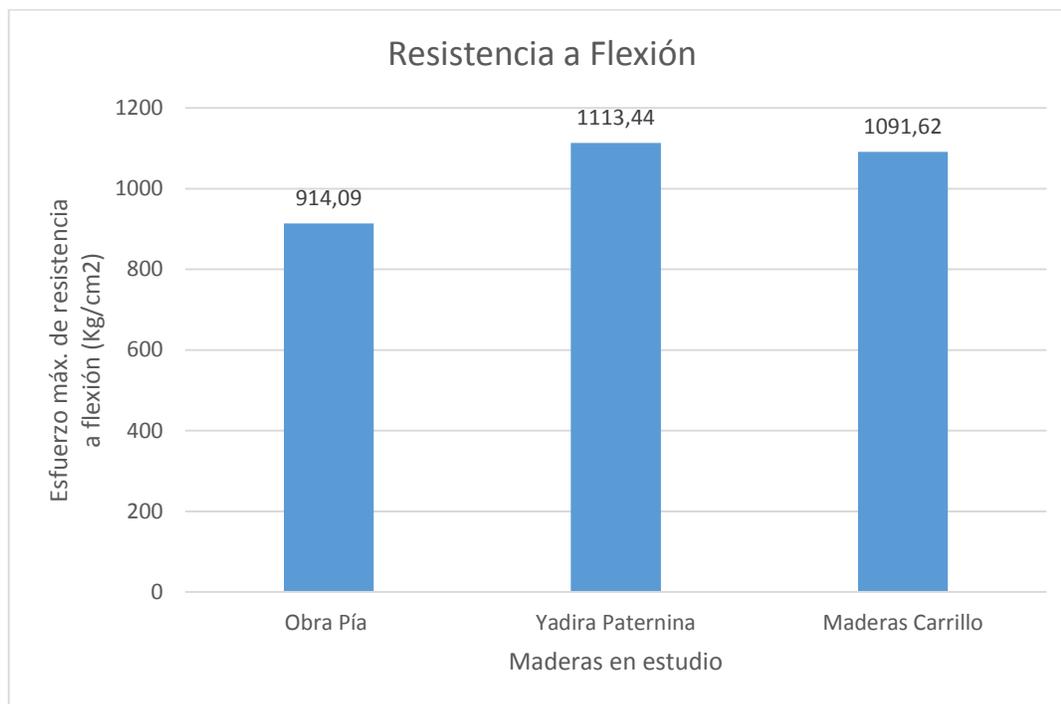
Fuente: Autores.

Tabla 25. Valores de carga y esfuerzo máximo de flexión obtenidos para las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).

Maderas Carrillo		
Muestra	Carga Máx (N)	Esfuerzo Máx (Kg/cm²)
1	170.42	1150.34
2	163.51	1103.69
3	161.23	1088.30
4	149.82	1011.29
5	167.14	1128.20
6	154.37	1042.00
7	165.56	1117.53
PROMEDIO	161.72	1091.62

Fuente: Autores.

Gráfico 8. Resultados obtenidos de resistencia a la flexión para las muestras de madera en estudio.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede apreciar:

- La madera que presenta mejores cualidades de resistencia a la flexión es la obtenida a través de Yadira Paternina, con un esfuerzo máximo obtenido de 1113.44 Kg/cm².
- La madera obtenida en Maderas Carrillo presenta un resultado intermedio, el cual difiere en un 1.9% con respecto al valor de la madera de Yadira Paternina, lo cual muestra que la diferencia no es muy significativa.
- La madera extraída de Obra Pía, es la que presenta el menor valor de resistencia a la flexión, con una diferencia de 17.9% con respecto al valor obtenido para la madera de Yadira Paternina, lo cual evidencia cierto grado de deterioro del material con respecto a las maderas nuevas.

En el trabajo desarrollado por Ayola y Matute (2013), se evaluó la resistencia a la flexión para probetas de mayor tamaño, usando la norma NTC3377.



Las dimensiones de las probetas usadas para el ensayo mencionado eran de 5x5x76 cm. Teniendo en cuenta que los resultados para el esfuerzo máximo de resistencia a la flexión en el trabajo de Ayola y Matute (2013) fueron dados en N/mm², se hizo la conversión correspondiente, y se obtuvo que para la madera Guayacán el esfuerzo máximo fue en promedio de 1165.37 Kg/cm², valor que es mayor al obtenido para las muestras ensayadas en el presente estudio, pero de igual forma se asemeja al obtenido para las probetas obtenidas a través de Yadira Paternina, con una diferencia porcentual de 4.66%.

5.2.3. Ensayo de resistencia al corte o cizallamiento (paralelo al grano)

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta los lineamientos de la norma NTC 775, usando madera Guayacán. Para la realización del ensayo se usaron probetas con las siguientes dimensiones: 5x5x6.25 cm, con las especificaciones indicadas en la norma. Se usaron siete probetas para cada una de las fuentes de donde se obtuvo el material. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 26. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera antiguas (Obra Pía).

Obra Pía		
Muestra	Carga Máx (Kg-f)	Esfuerzo Máx (Kg-f/cm²)
1	2415.90	96.64
2	2497.20	99.89
3	2465.30	98.61
4	2514.80	100.59
5	2457.10	98.28
6	2459.50	98.38
7	2487.60	99.50
PROMEDIO	2471.06	98.84

Fuente: Autores.



Tabla 27. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera nuevas (Yadira Paternina).

Yadira Paternina		
Muestra	Carga Máx (Kg-f)	Esfuerzo Máx (Kg-f/cm²)
1	3151.40	126.06
2	3097.10	123.88
3	3075.30	123.01
4	3102.50	124.10
5	3172.70	126.91
6	3184.30	127.37
7	3117.50	124.70
PROMEDIO	3128.69	125.15

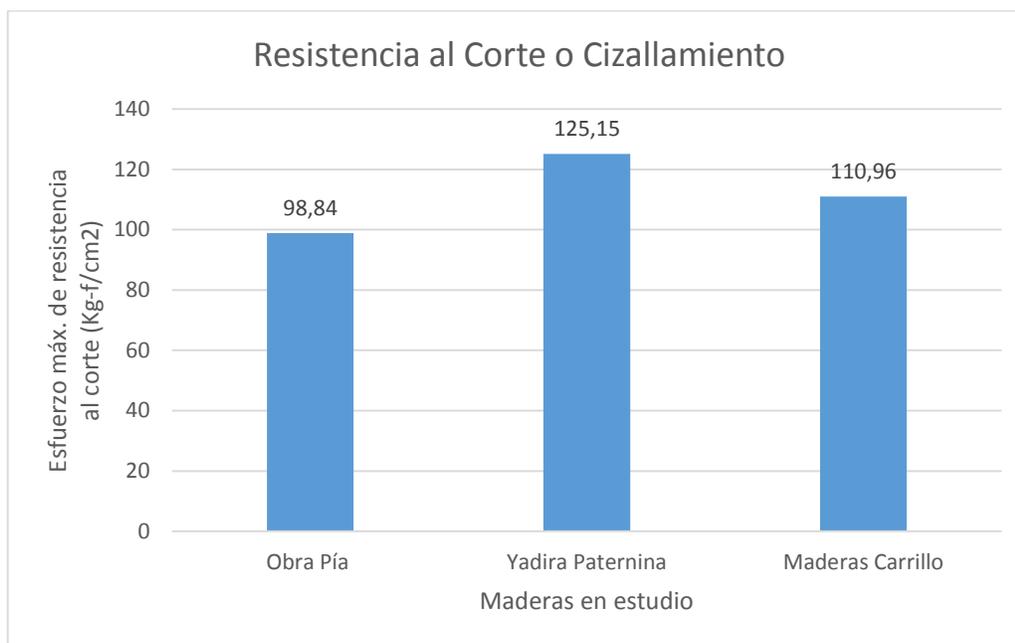
Fuente: Autores.

Tabla 28. Valores de carga y esfuerzo cortante máximo obtenidos para las muestras de madera nuevas (Maderas Carrillo).

Maderas Carrillo		
Muestra	Carga Máx (Kg-f)	Esfuerzo Máx (Kg-f/cm²)
1	2804.10	112.16
2	2743.20	109.73
3	2768.10	110.72
4	2790.30	111.61
5	2823.40	112.94
6	2725.80	109.03
7	2763.70	110.55
PROMEDIO	2774.09	110.96

Fuente: Autores.

Gráfico 9. Resultados obtenidos de resistencia al corte para las muestras de madera en estudio.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede apreciar:

- El valor más alto de resistencia al corte es el obtenido para la madera de Yadira Paternina, con un valor promedio de 125.15 Kg-f/cm².
- El segundo mejor valor obtenido en las pruebas de resistencia al corte, fue el de la madera proveniente de Maderas Carrillo, con un valor promedio de 110.96 Kg-f/cm², lo cual representa una diferencia porcentual de 11.33%, lo cual puede considerarse como una diferencia significativa.
- Por último, el valor de resistencia al corte obtenido para la madera extraída de Obra Pía fue de 98.84 Kg-f/cm², el cual es significativamente menor con respecto al valor obtenido para la resistencia al corte de la madera de Yadira Paternina, con una diferencia de 21.02%.

En el trabajo realizado por Ayola y Matute (2013), el ensayo de resistencia al corte fue realizado con probetas del mismo tamaño de las usadas en el presente trabajo de grado. El valor promedio obtenido para la resistencia al corte de probetas de madera Guayacán fue de 19.63 MPa, es decir, 200.17 Kg-f/cm². Con lo anterior se deduce que este



resultado fue mayor que los registrados en el presente trabajo de grado, mostrando una gran diferencia de aproximadamente 60% con respecto al valor obtenido para las muestras de madera de Yadira Paternina, las cuales registraron el valor promedio más alto en el presente trabajo. Tal diferencia observada podría explicarse teniendo en cuenta en que es posible que las muestras poseen propiedades distintas entre sí, no conocemos el origen exacto de las muestras de madera usadas en los ensayos realizados por Ayola y Matute y por ello resulta complicado determinar la razón exacta de que se presente la diferencia de valores de resistencia al corte observada.

5.3. ENSAYOS CON MORTEROS

5.3.1. Resistencia a la compresión por esclerómetro o martillo de Schmidt

Los siguientes son los resultados correspondientes al ensayo de resistencia a la compresión de morteros mediante el uso del esclerómetro, este ensayo sólo se consideró para evaluar la resistencia a la compresión del mortero presente en la construcción antigua (Obra Pía), debido a la dificultad de obtener probetas adecuadas para la realización de ensayos destructivos de resistencia a la compresión según lo indica la norma NTC 220.

Tabla 29. Lecturas de rebotes registradas en el esclerómetro, según cada punto ensayado.

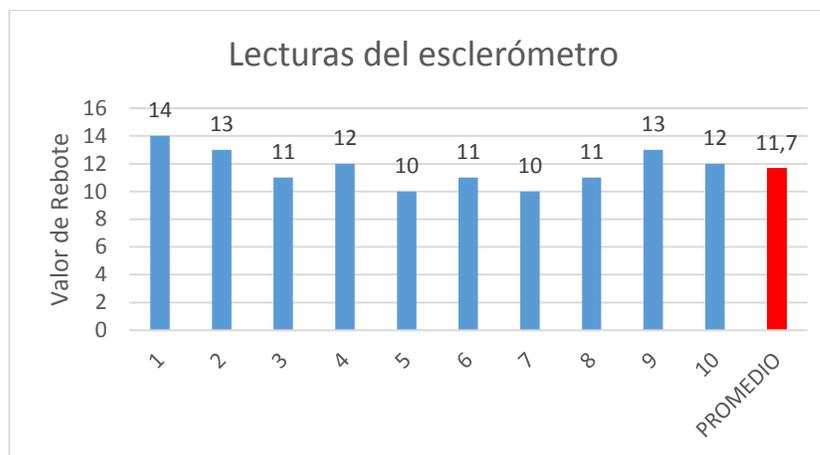
Muestra(Punto)	Lectura
1	14
2	13
3	11
4	12
5	10
6	11
7	10
8	11
9	13
10	12
PROMEDIO	11.7

Fuente: Autores.

A partir de los datos anteriores se puede inferir lo siguiente:

- El promedio de lecturas del valor del rebote del esclerómetro corresponde a 11,7.
- El 50% de los valores de las lecturas registradas se encuentran por encima del promedio, por lo cual el otro 50% se encuentra por debajo de dicho promedio.

Gráfico 10. Lecturas de rebotes obtenidas en cada muestra mediante el uso del esclerómetro.



Fuente: Autores.

Con el promedio obtenido, se calcula la resistencia a la compresión de los ladrillos, mediante extrapolación lineal, conociendo los valores de resistencia correspondientes para las lecturas de rebote de 22 y 23, ya que estas son las mínimas lecturas del equipo que registran valores de resistencia a la compresión.

Tabla 30. Resistencia a la compresión obtenida para el mortero antiguo presente en Obra Pía.

Lectura	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
11.7	7
22	110
23	120

Fuente: Autores.

A partir de lo anterior se infiere que el valor de resistencia a la compresión del mortero es de **7 Kg/cm²**, este será el valor de referencia a usar para la comparación de los resultados de resistencia a la compresión de las probetas de mortero con material nuevo, la cual se determinará por medio de ensayos destructivos.



Por otro lado, cabe anotar que dentro de la bibliografía y los estudios consultados, no existen referencias de la evaluación de la resistencia a la compresión de morteros mediante el uso del esclerómetro, obteniéndose los resultados de resistencia a la compresión de este material a través de ensayos destructivos.

5.3.2. Ensayo de Resistencia a la Compresión con la Maquina Universal

Para la realización de las muestras de este ensayo, se tuvo en cuenta una relación de 1:2:1 (cal, arena y cemento) y la cantidad de agua se determinó a partir del cemento con una relación de 0.5, esta relación fue establecida con base en la experiencia y los conocimientos de la Arquitecta Rosa Martínez; la justificación de la adición de cemento se debe a que hoy en día la Cal no presenta las mismas propiedades que presentaba anteriormente.

Se realizaron 42 muestras, de las cuales 21 eran con la Cal adquirida en la Ferretería Antioquia y las otras 21 eran con la Cal Nare, para posteriormente ensayarlas a los 7, 14, y 28 días, es decir, 7 muestras por cada día como se tenía previsto, basándose en la norma Icontec NTC-220. Este ensayo se realizó con la maquina Universal, en el laboratorio del Ing. Modesto Barrios.

A continuación se observan los resultados obtenidos por cada tipo de mortero:

Tabla 31. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 7 días.

Mortero con Cal de Ferretería Antioquia (7 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	12,7	25	51,84
2	15,3	25	62,45
3	13,6	25	55,51
4	14,4	25	58,78
5	12,6	25	51,43
6	13,5	25	55,10
7	14,1	25	57,55
PROMEDIO	13,7	25	56,1
Desviación Estándar	0,954	-	3,893

Fuente: Autores.



Tabla 32. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 14 días.

Mortero con Cal de Ferretería Antioquia (14 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	13,7	25	55,92
2	12,4	25	50,61
3	12,2	25	49,80
4	14,5	25	59,18
5	13,8	25	56,33
6	15,4	25	62,86
7	14,3	25	58,37
PROMEDIO	13,8	25	56,2

Fuente: Autores.

Tabla 33. Resistencia a la compresión del mortero con Cal de la Ferretería Antioquia ensayado a los 28 días.

Mortero con Cal de Ferretería Antioquia (28 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	14,4	25	58,78
2	15,1	25	61,63
3	13,9	25	56,73
4	14,8	25	60,41
5	12,9	25	52,65
6	12,6	25	51,43
7	14,3	25	58,37
PROMEDIO	14,0	25	57,1

Fuente: Autores.

Tabla 34. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 7 días.

Mortero con Cal Nare (7 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	17,4	25	71,02
2	17,8	25	72,65
3	16,0	25	65,31
4	18,7	25	76,33
5	16,3	25	66,53
6	18,4	25	75,10
7	17,2	25	70,20
PROMEDIO	17,4	25	71,0

Fuente: Autores.



Tabla 35. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 14 días.

Mortero con Cal Nare (14 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	15,6	25	63,67
2	16,9	25	68,98
3	16,2	25	66,12
4	17,5	25	71,43
5	18,3	25	74,69
6	19,1	25	77,96
7	18,6	25	75,92
PROMEDIO	17,5	25	71,3

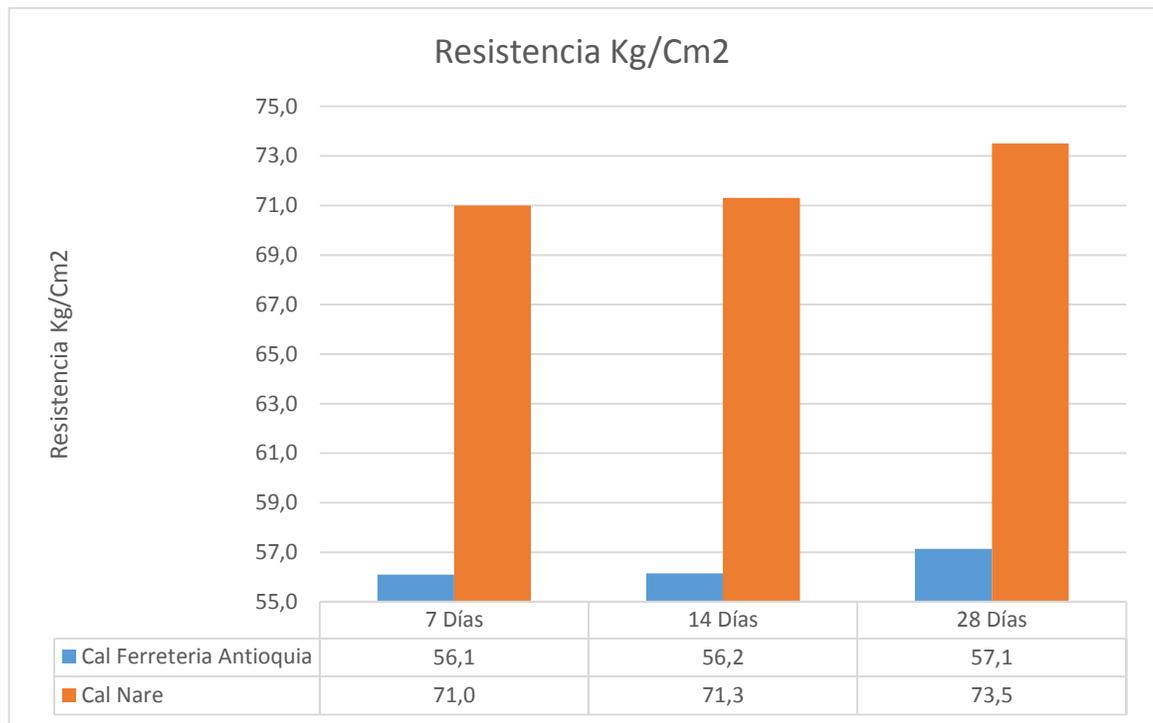
Fuente: Autores.

Tabla 36. Resistencia a la compresión del mortero con Cal Nare ensayado a los 28 días.

Mortero con Cal Nare (28 días)			
Muestra	Carga (KN)	Área (Cm2)	Resistencia (Kg/Cm2)
1	19,4	25	79,18
2	18,1	25	73,88
3	15,3	25	62,45
4	18,2	25	74,29
5	17,3	25	70,61
6	19,2	25	78,37
7	18,5	25	75,51
PROMEDIO	18,0	25	73,5

Fuente: Autores.

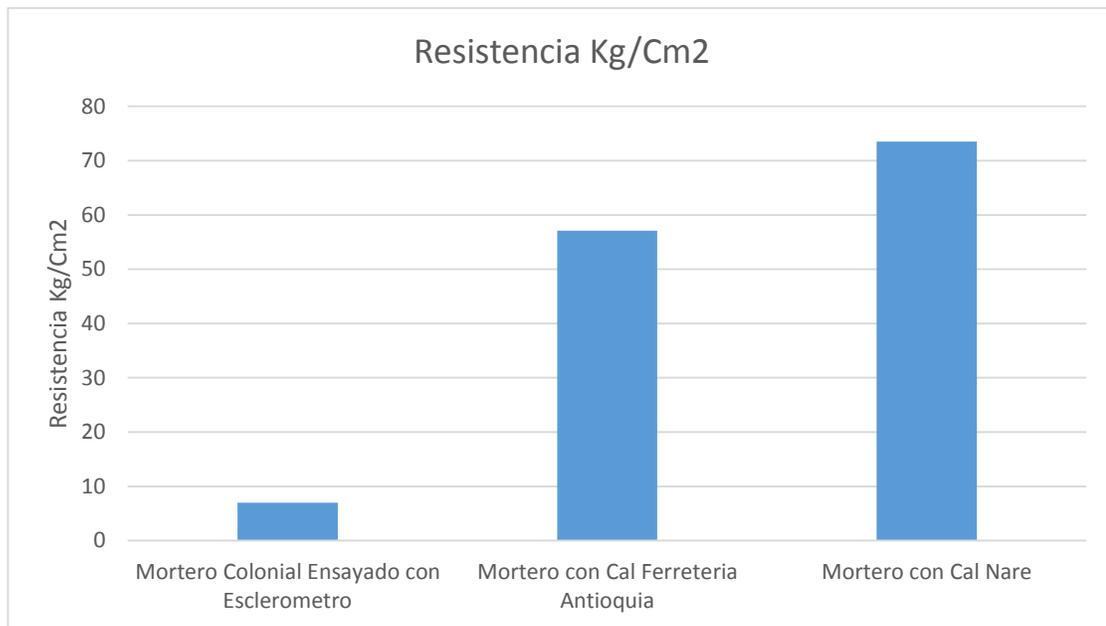
Gráfico 11. Resistencia a la Compresión a los 7, 14, y 28 días de la cal de la ferretería Antioquia y la Cal Nare.



Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados expuestos anteriormente, se observa que los ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días de la Cal adquirida en la Ferretería Antioquia presentan una resistencia promedio de 56.1 Kg/cm², 56.2 Kg/cm², y 57,1 Kg/cm² respectivamente, claramente se infiere que no se presentan grandes variaciones de acuerdo a los días que se ensayaron las muestras; con respecto a los resultados obtenidos de la Cal Nare se obtuvo un promedio de 71.0 Kg/cm², 71.3 Kg/cm², y 73.5 Kg/cm², donde se observa que tampoco se presentaron grandes variaciones. Comparando los tipos de morteros ensayados, se observa que el mortero realizado con Cal adquirida en la Ferretería Antioquia presenta una resistencia menor que el mortero realizado con Cal Nare.

Gráfico 12. Comparación entre el mortero ensayado con esclerómetro y ensayado con la maquina Universal.



Fuente: Autores.

Analizando los resultados obtenidos por medio de esclerómetro de la resistencia a la compresión del mortero antiguo presente en Obra Pía, se nota una gran diferencia con respecto a los resultados de los morteros nuevos, ya que se pasa de los 7 Kg/cm² para el mortero antiguo, a los 73.5 Kg/cm² para el mortero con cal Nare y los 57.1 Kg/cm² para el mortero con cal de la Ferretería Antioquia. Lo anterior supone una diferencia porcentual de 90.48% con respecto al primero y de 87.74% con respecto al segundo.

Teniendo en cuenta los estudios descritos en esta investigación como parte de antecedentes, se observa que no existe un estudio específico del mortero donde se pueda observar su funcionamiento de forma individual o que se haya realizado en las edificaciones de tipología colonial; como se ha dicho anteriormente, los estudios acerca del mortero se realizaron en combinación con el ladrillo a manera de muros, o bien sea para el cordón amurallado de la ciudad de Cartagena.

Figura 8. Muestras de Mortero recién preparadas



Fuente: Autores.

Figura 9. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Mortero



Fuente: Autores.



6. CONCLUSIONES

- Los resultados de los ensayos de la resistencia a la compresión del ladrillo de Obra Pía a través del esclerómetro arrojaron un promedio de 119 Kg/cm² y los realizados a través de la maquina universal arrojaron un resultado donde se observa que la diferencia es de casi 3 veces menor que la del esclerómetro, con un promedio de 41,1 Kg/cm². Hay que tener en cuenta que en el ensayo de la maquina universal no existió la mayor precisión posible, puesto que las lecturas se tomaron en el momento que se observaron fisuras o presentó fallas el ladrillo, esto se hizo ya que la maquina no marcaba un punto exacto para tomar la carga ejercida en el ladrillo. Por otro lado hay que tener en cuenta que la carga ejercida al ladrillo en la maquina universal se aplica verticalmente, es decir, donde hay mayor área del ladrillo, mientras que en el ensayo de esclerómetro las lecturas de los rebotes se tomaron de forma horizontal, es decir, a un lado del ladrillo donde presentaba menor área, esto debido a que se encontraba en la pared o muro, por lo tanto si se tienen en cuenta estos dos aspectos se pueden encontrar las variaciones entre los dos resultados.
- Comparando los resultados de los ensayos de la resistencia a la compresión con la maquina universal, se obtuvo que el mayor fue el del ladrillo de Obra Pía con 41,1 Kg/cm², posteriormente el de la ladrillera Bayunca con 26,2 Kg/cm² y por último el ladrillo de la Ferretería Antioquia con 22,3 Kg/cm². Se observa que la resistencia alcanzada por el ladrillo antiguo es casi el doble que la de los ladrillos nuevos.
- Los resultados de la Gravedad Especifica Bulk, Gravedad Especifica Bulk Saturada con Superficie Seca y Gravedad Especifica Aparente para los ladrillos de Obra Pía son 1.7, 1.9, y 2 respectivamente, para el ladrillo de la Ferretería Antioquia 1.6, 1.9 y 2.2 respectivamente y para la ladrillera Bayunca 1.5, 1.8 y 2.1; el porcentaje de absorción promedio para cada tipo de ladrillo fue de 8.9%, 16.7% y 16.6% respectivamente, por lo que se infiere que los ladrillos de Obra Pía son más Compactos y presentan menos porosidad.
- El ladrillo de mayor permeabilidad fue de la Ferretería Antioquia con un valor de 3,98345E-06 cm/seg, le sigue el ladrillo de la Ladrillera Bayunca con 3,65255E-06



cm/seg y por último el ladrillo de la Obra Pía con $2,71435E-06$ cm/seg, basándose en esto y teniendo en cuenta que la permeabilidad depende de la distribución del tamaño de los poros, se confirma que el ladrillo de Obra Pía es menos poroso, con un 32% menos de permeabilidad con respecto al ladrillo de la Ferretería Antioquia .

- Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de desgaste con la Máquina de los Ángeles, los ladrillos nuevos que poseen menor desgaste y por lo tanto mayor dureza son los adquiridos en la ladrillera Bayunca, con un porcentaje de desgaste de 79.80%, en comparación con el que se obtuvo para los ladrillos de la Ferretería Antioquia de 83.49%. En comparación, los ladrillos de Obra Pía tienen el menor desgaste de todos los ladrillos ensayados (61.94%).
- Basándose en los resultados obtenidos se puede concluir que los ladrillos adquiridos en la Ferretería Antioquia y la ladrillera Bayunca no son los más adecuados para ser utilizados en un proceso de restauración.
- La madera obtenida por medio de la comerciante Yadira Paternina es la que mejores resultados presenta en los ensayos de peso específico aparente, con valores de 1.25 g/cm^3 , 1.18 g/cm^3 y 1.15 g/cm^3 en estado verde, anhidro y básico respectivamente; y presenta por tanto una diferencia de 6.80%, 7.71% y 9.20% (respectivamente) con base en las muestras de Maderas Carrillo.
- Por concepto de resistencia a la flexión, las muestras de madera más apropiadas para los procesos de restauración son las adquiridas por medio de Yadira Paternina con una resistencia a flexión máxima de 1113.44 Kg/cm^2 , aunque cabe destacar que las muestras de Maderas Carrillo presentan buenos resultados, obteniéndose una diferencia porcentual entre los valores de ambas fuentes de distribución de sólo un 1.9%.
- Teniendo en cuenta los resultados de resistencia al corte o cizallamiento en maderas, las muestras más apropiadas para ser usadas en procesos de restauración son las de



Yadira Paternina con un valor promedio de 125.15 Kg-f/cm², en comparación con los 110.96 Kg-f/cm² obtenidos para las muestras de Maderas Carrillo.

- Analizando los resultados obtenidos para los diferentes ensayos de madera, es notable que en todos ellos, las muestras obtenidas de Obra Pía son las que presentan los peores valores en los ensayos. Esto representa claramente el estado de deterioro en que se encuentra la madera debido a la exposición a la intemperie durante tantos años.
- Considerando la resistencia a la compresión obtenida a los 28 días, se concluye que la cal Nare es la más apropiada para su uso en procesos de restauración, ya que registra una resistencia de 73.5 Kg/cm², en comparación con el valor de 57.1 Kg/cm² para la cal obtenida en la Ferretería Antioquia.
- Se observa una diferencia notable (de alrededor de 87.74% y 90.48%) entre los valores de resistencia a la compresión del mortero nuevo, con respecto a los valores obtenidos por medio del esclerómetro para mortero antiguo. Lo anterior puede darse debido a varios factores, entre los cuales se destacan: la adición de cemento a la mezcla de mortero nuevo, éste hace que tenga más resistencia y complemente las propiedades de la cal, y el deterioro por exposición a la intemperie y la antigüedad de la estructura.



7. RECOMENDACIONES

Luego de desarrollar la investigación correspondiente al presente trabajo de grado, se ha analizado que con el fin de ampliar y mejorar los datos y la información obtenida, de tal manera que sean de mayor utilidad para futuras investigaciones, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Analizar otros materiales presentes en las casas de tipología colonial, que inclusive no necesariamente tienen que ser de tipo estructural, sino también ornamental, como por ejemplo el hierro usado para rejas antiguas, los elementos de piedra y arcilla usados para los pisos, entre otros.
- Analizar los materiales en otras fuentes diferentes a las presentadas en este trabajo de grado, con el fin de ampliar el conocimiento de las propiedades de los materiales que se pueden encontrar en el medio para llevar a cabo los procesos de restauración y así poder dar más herramientas para los profesionales que se dedican a ello para elegir con más criterio dónde adquirir mejores materiales.
- Estudiar la resistencia que pueden presentar el ladrillo y mortero en conjunto, a manera de muretes en las casas coloniales.
- En el desarrollo de la investigación se tuvo una gran limitación por el hecho de que la Máquina Universal de la Universidad de Cartagena se encontraba dañada, por lo cual se recurrió a la ayuda del Ingeniero Modesto Barrios para la realización de ciertos ensayos. Por lo anterior, se sugiere que se preste mayor atención al mantenimiento y reparación de este equipo que es de gran importancia.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcillas de Colombia*. (s.f.). Obtenido de Historia del Ladrillo: <http://www.arcillasdecolombia.com>
- Aula de Tecnologías*. (Octubre de 2009). Obtenido de Blog de Tecnología e Informática: <http://auladetecnologias.blogspot.com>
- Ayala, F., & Andreu, F. (1987). *Manual de Ingeniería de Taludes*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ayola, J., & Matute, M. (2013). *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera usada comoviga de etrepiso en las viviendas coloniales del centro histórico de la ciudad de Cartagena*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Barluenga, G., Estirado, F., Undurraga, R., Conde, J. F., Agua, F., Villegas, M. Á., & García-Heras, M. (2014). Brick masonry identification in a complex historic building, the Main College of the University of Alcalá, Madrid (Spain). *Construction and Building Materials. Elsevier*, 39-46.
- Beer, F., E., J., & DeWolf, J. (1992). *Mecánica de materiales*. Bogotá: McGraw Hill.
- Berganza, A., & Hernández, O. (2007). Ensayos no destructivos. *Boletín IRAM*.
- Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., & Mazzolani, F. (2006). Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation. *Engineering Structures. Elsevier*, 729-744.
- Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., & Mazzolani, F. (2010). Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. *Engineering Structures. Elsevier*, 442-448.
- Elert, K., Cultrone, G., Rodríguez, C., & Pardo, E. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historic buildings - influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage. Elsevier*, 91-99.
- España, J., & Tapia, M. (2008). *Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipología colonial*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Ewing, B., & Kowalsky, M. (2004). Compressive Behaviour of Unconfined and Confined Clay Brick Masonry. *journal of Structural Engineering. ASCE*, 650-661.
- Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá: Bhandar Editores Ltda.
- ICONTEC. (1973). NTC:663: Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. *Norma Técnica Colombiana*.
- ICONTEC. (1974). NTC-290: Maderas. Determinación del peso específico aparente. *Norma Técnica Colombiana*.
- ICONTEC. (1974). NTC-775: Maderas. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano. *Norma Técnica Colombiana*.



- ICONTEC. (2004). NTC-220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado. *Norma Técnica Colombiana*.
- ICONTEC. (2005). NTC-4017: Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. *Norma Técnica Colombiana*.
- López-Arce, P., García-Guinea, J., Gracia, M., & Obis, J. (2003). Bricks in historical buildings of Toledo City: characterization and restoration. *Materials characterization. Elsevier*, 59-68.
- Martín, F. M. (1996). *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Madrid: Complutense.
- Mejía, L. C. (s.f.). *Biblioteca Virtual*. Obtenido de Biblioteca Luis Angel Arango: <http://www.banrepcultural.org/>
- Meza, M., & Cohen, 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 de Indias: Universidad de Cartagena.
- Terán, J. (2004). Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. *Conserva*, 101-122.

