

**CONVENIENCIA DEL USO DE LA PIEDRA CALIZA Y LA ARGAMASA EN LOS
PROCESOS DE RESTAURACION DE LA ESCARPA EN LAS MURALLAS DE
CARTAGENA DE INDIAS.**



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

ADALBERTO RAFAEL CORONADO REYES

JOSÉ DANIEL COGOLLO GALINDO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA DE INDIAS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

2015

**CONVENIENCIA DEL USO DE LA PIEDRA CALIZA Y LA ARGAMASA EN LOS
PROCESOS DE RESTAURACION DE LA ESCARPA EN LAS MURALLAS DE
CARTAGENA DE INDIAS.**

Investigadores:

ADALBERTO RAFAEL CORONADO REYES

JOSÉ DANIEL COGOLLO GALINDO

Trabajo de grado para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Grupo de investigación:

ESCONPAT

Línea De Investigación:

CONSERVACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LOS MONUMENTOS

Investigador Director:

M.Sc. JORGE LUIS ALVAREZ CARRASCAL

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA DE INDIAS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

2015



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director
JORGE ALVAREZ CARRASCAL

Firma del Jurado
ARNOLDO BERROCAL OLAVE

Firma del Jurado
JOSÉ ESPAÑA MORATTO



DEDICATORIAS

Dedicamos este trabajo de grado principalmente a Dios por darnos las fuerzas para continuar hasta el final y guiarnos en el camino de la honestidad. A nuestros padres por darnos la vida y apoyarnos a diario en la construcción de este logro para nuestras vidas.

Igualmente dedicamos este proyecto a la Universidad de Cartagena por ser nuestra Alma Mater y guiarnos hacia la excelencia



AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la sabiduría y brindarnos la fortaleza para dejar atrás todas las dificultades en este proceso de formación. Igualmente a nuestros Padres y Familiares por el apoyo incondicional brindado.

A nuestros profesores por sus valiosos aportes de conocimiento y experiencia, en especial a nuestro director de tesis el Ing. Jorge Álvarez Carrascal, por sus asesorías permanentes y acertadas recomendaciones para la culminación de este proyecto de investigación.

A la “*Escuela Taller Cartagena De Indias*” por habernos facilitado los permisos para realización de los ensayos no destructivos en las murallas de Cartagena de Indias.

A la empresa “*Antonio Cogollo Ingeniería S.A.S*” por el préstamo de sus laboratorios y equipos que fueron de gran utilidad para llevar a cabo esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO REFERENCIAL	17
1.1 ESTADO DEL ARTE	17
1.2 MARCO TEÓRICO	26
1.2.1 Historia De Cartagena De Indias	26
1.2.2 Murallas de Cartagena de Indias	28
1.2.2.1 Historia de las Murallas de Cartagena.....	29
1.2.2.2 Etapas de Construcción de las Murallas.....	33
1.2.3 Materiales Pétreos	34
1.2.3.1 Propiedades de los Materiales Pétreos	34
1.2.3.2 Clasificación De Los Materiales Pétreos.	42
1.2.4 Materiales que componen el Cordón Amurallado.	45
1.2.5 Consideraciones para la restauración de Patrimonios históricos	49
1.2.5.1 Principios teóricos.....	49
1.2.5.2 Grados de intervención.....	50
1.2.5.3 Tramo a estudiar:.....	52
1.2.6 Tipos de Ensayos	53
1.2.6.1 Ensayos no Destructivos.	53
1.2.6.2 Ensayos Destructivos	55
2. OBJETIVOS	57
2.1 GENERAL	57
2.2 ESPECÍFICOS	57
3. ALCANCE	58
4. METODOLOGIA	64
4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN: MIXTA	64
4.2 TECNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	64
4.2.1 Información primaria	64
4.2.2 Información secundaria	75
4.3 TECNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	76
5. RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS	77



5.1 RESULTADO Y ANALISIS DE ENSAYO DE ABSORCION Y GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	77
5.2 RESULTADO Y ANALISIS ENSAYO DE DESGASTE.....	79
5.3 RESULTADO Y ANALISIS ENSAYO DE HUMEDAD	81
5.4 RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS A MORTEROS DE ARGAMASA.....	83
5.5 RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYO DE MARTILLO DE REBOTE EN EL TRAMO.	85
5.6 RESULTADOS Y ANALISIS ENSAYOS A COMPRESIÓN EN MURETES (MARCO DE PRUEBA).	88
5.8 RESULTADO Y ANALISIS DE PRUEBAS DE ULTRASONIDO EN LA ESCARPA DE LAS MURALLAS.....	93
5.9 COMPARACIÓN GENERAL DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN..	95
5.10 CURVAS ESFUERZO – ROTURA	96
6. CONCLUSIONES.....	99
7. RECOMENDACIONES.....	101
8. BIBLIOGRAFIA.....	102



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Densidades de los principales minerales formadores de roca	36
Tabla 2. Clases de Porosidad	38
Tabla 3. Calidad de la roca en función de la porosidad.....	39
Tabla 4. Densidad global y porosidad de rocas usadas en construcción.	40
Tabla 5. Clasificación de las rocas sedimentarias.....	44
Tabla 6. Gradaciones INV-E 219-07 y INV-E 218-07.....	68
Tabla 7. Relación Altura/Espesor.	71
Tabla 8. Resultado Ensayos de Porosidad y Peso Específico.....	77
Tabla 9. Resultado Ensayo de Desgaste	79
Tabla 10. Resultados ensayo de Humedad.	81
Tabla 11. Resultado del ensayo de Tiempo de Fraguado.	83
Tabla 12. Resultado ensayo consistencia normal.	84
Tabla 13. Resultado Prueba Martillo de Rebote punto (1, 2,3).	85
Tabla 14. Resultado Prueba Martillo de Rebote punto (4, 5, 6).	85
Tabla 15. Resultado Ensayo Martillo de Rebote Puntos (7, 8, 9)	86
Tabla 16. Resumen de datos obtenidos en los 9 puntos	87
Tabla 17. Resultado Ensayo a Compresión en Muretes.....	88
Tabla 18. Resultados de Ensayos a Muestras Patrón.....	91
Tabla 19. Resultado Ensayo De Ultrasonido en La Escarpa.....	93

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Plano de la ciudad de Cartagena, 1735.....	27
Ilustración 2. Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena.....	32
Ilustración 3. Hipótesis extracción de la piedra	46
Ilustración 4. Esclerómetro (Martillo de Schmidt)	53
Ilustración 5. Ubicación planta de triturados	59
Ilustración 6. Cantera bonanza, dg31 100-175 l-101	60
Ilustración 7. Cantera la Constancia.....	61
Ilustración 8. Ubicación universidad de Cartagena.....	62
Ilustración 9. Ubicación Laboratorios universidad de Cartagena	63
<i>Ilustración 10. Localización tramo.....</i>	<i>63</i>
Ilustración 11. Material extraído en la Constancia.	65
Ilustración 2. Material extraído en Coloncito.	66
Ilustración 3. Material extraído en Bonanza	66
Ilustración 4. Toma de Datos para Peso Específico.....	67
Ilustración 5. Pesaje de Muestra Sumergida.....	68
Ilustración 6. Ensayo Desgaste Maquina de los ángeles	69
Ilustración 17. Muestras Sumergidas para cálculo de Porosidad.	70
Ilustración 8. Muestra seca para ensayo de humedad natural.....	70
Ilustración 19. Calculo ensayo a mortero de cal hidráulica.	71
Ilustración 10. Esquema construcción de Muretes.....	71
Ilustración 21. Muretes Construidos para ser ensayados.....	72
Ilustración 12. Ensayo a Compresión de Muretes.....	73
Ilustración 13. Tramo de Muralla Ensayada.....	74
Ilustración 14. Ensayo de Martillo de Rebote en el Tramo.	75
Ilustración 25. Estado de las muestras después de la prueba de Desgaste.....	79
Ilustración 26. Equipo usado para el secado de las muestras durante el ensayo a humedad.	81
Ilustración 27. Murete de Coloncito (después de fallar).....	89



LISTA DE GRAFICOS

Grafica 1. Comparación Ensayos Absorción.....	78
Grafica 2. Resultado Comparativo Ensayo Desgaste.	80
Grafica 3. Comparación Resultados Ensayo Humedad.)	82
Grafica 4. Comparación Resistencia a la Compresión mediante Esclerómetro (Escarpa).	87
Grafica 5. Comparación Resistencia a la Compresión (Marco de Prueba).....	90
Grafica 6. Resultados Resistencia a la Compresión (Marco de Prueba) Muestras de cada cantera. 92	
Grafica 7. Comparación general ensayos a Compresión.....	95
Grafica 8. Curva Esfuerzo - Rotura (Cantera Bonanza).	96
Grafica 9. . Curva Esfuerzo - Rotura (Cantera Coloncito).	97
Grafica 10. . Curva Esfuerzo - Rotura (Cantera Constancia).....	98

RESUMEN

En la ciudad de Cartagena de indias distrito turístico y cultural se presentan a menudo restauraciones a diferentes monumentos y edificaciones, gran cantidad con el propósito de conservar el título otorgado por la UNESCO de Patrimonio Histórico de la Humanidad. Al momento de realizar restauraciones a monumentos históricos, se deben utilizar materiales que posean propiedades físicas y mecánicas similares a los que fueron usados para construir la estructura original, con el fin de que se conserve una armonía estética y se restablezca la continuidad de sus formas.

La literatura nos orienta a que los monumentos históricos de la ciudad de Cartagena fueron construidos con materiales obtenidos de canteras cercanas (Segovia, 2015), en especial su cordón amurallado. Por medio de esta investigación se busca establecer si los materiales usados en restauraciones a las murallas de la ciudad de Cartagena de indias, material calizo de canteras cercanas a la ciudad y argamasa (mortero de pega), a través de una comparación de sus características físicas y mecánicas, Esto para comprobar si dichos materiales son los óptimos al momento restaurar este tipo de obras.

El proyecto se plantea como una investigación de tipo mixto, donde se reflejan exploraciones literarias con el fin de recopilar información referente a la temática a trata, también ensayos de laboratorio a muestra de materiales, ensayos destructivos y no destructivos. El proyecto se desarrolló en diferentes fases de estudio, como primera de ellas la recopilación y análisis de información existente, la identificación de los lugares de estudio y los lugares donde son adquiridas las muestras de material, posterior a esto se procedió a la recolección de datos obtenidos a través de ensayos físicos, destructivos y no destructivos, los ensayos físicos que se realizaron a muestras de canteras cercanas a la ciudad fueron: desgates, absorción, gravedad específica y humedad, los ensayos no destructivos a las murallas de la ciudad de Cartagena y a muestras de piedra caliza fueron ensayos de esclerómetro y ultrasonido, en cuanto a los ensayos destructivos realizados a muretes construidos de material calizo y argamasa, se ensayaron en un marco de pruebas. Después de la recolección de todos estos datos se continuó con el análisis de los datos y la presentación del informe final.



Después de la comparación y análisis de resultados se concluyó que el material extraído de las canteras (Coloncito, Bonanza y Constancia) posee propiedades físicas muy similares entre ellos, con ligeras variaciones siendo el material de la cantera Bonanza el cual cuenta con mejores condiciones y propiedades, Se determinó que por diferencias muy ligeras la cantera Bonanza tiene el material con propiedades físicas mejor adaptadas para la restauración, de la escarpa de las murallas. Se estableció que el material al ser testado a la compresión por separado y no como como conjunto (murete) tiene una resistencia a la compresión muy cercana a la que se obtiene en la escarpa que va de 108.63 Kg/Cm² a 164.78 Kg/Cm². Por lo que se concluyó que los materiales como tal poseen una resistencia similar a la del material antiguo y que la disminución a 28,67 Kg/Cm² en los muretes de material nuevo se debe a cambios significativos en el mortero usado (argamasa). Teniendo en cuenta el resultado obtenido en el marco de prueba, los muretes de mampostería (Representación a escala de la escarpa de las murallas) no alcanzan un 30% de la resistencia a la compresión en comparación con el resultado promedio de los 3 puntos ensayados con el ultrasonido en la escarpa original (Material antiguo). Se concluye que estas muestras al trabajar como conjunto tienen una resistencia a la compresión muy baja en comparación con la de la escarpa, por tanto se determina que no son convenientes las restauraciones realizadas con estos materiales teniendo en cuenta los criterios y la metodología empleada en esta investigación, pero cabe resaltar que los materiales al ser ensayados de manera individual presentan propiedades similares a las de la escarpa de las murallas.

PALABRAS CLAVES:

Argamasa – Murete – Marco de Prueba – Ultrasonido – Escarpa – Murallas - Cartagena



ABSTRACT

In the city of Cartagena de Indias restorations are made to different monuments and buildings, in order to retain the title given by UNESCO Heritage of Humanity. At the moment of restoration of historical monuments, you must use materials that have similar physical and mechanical properties which were used to build the original structure, doing that the aesthetic harmony is preserved and the continuity of its forms is restored.

The literature leads us to the historical monuments of the city were built with materials obtained from nearby quarries (Rudolph, 2015), especially its walled cord. Through this research is to establish if the materials used in restoration of the walls of the city of Cartagena de Indias, chalky material quarries near the city and mortar (mortar paste), through a comparison of their physical characteristics and mechanical, This to see if these materials are optimal to do this kind of work.

The project is conceived as an investigation of mixed type, which scans literary reflect in order to collect information on the subject in question, also it shows laboratory tests of materials, destructive and non destructive tests. The project was developed in different phases of study, first the collection and analysis of existing data, identifying the study sites and the places where samples are acquired material after it proceeded to collect data obtained through physical, destructive and non-destructive testing, physical testing that is conducted to samples quarries near the city were desgates, absorption, specific gravity and moisture, non-destructive testing on the walls of the city of Cartagena and limestone samples were esclerómetro and ultrasonic tests, as for the destructive tests performed at low walls constructed of limestone material and mortar, were tested in a test framework. After collecting all this data it continued with data analysis and presentation of the final report.

After the analysis of results it was concluded that the material extracted from quarries (Coloncito, Bonanza and Constancia) has very similar physical properties including, with



slight variations, the material of the Bonanza quarry has better conditions and properties it was determined that Bonanza quarry material has the best physical properties suitable for the restoration of the escarpment of the walls. It was established that the material to be tested to the compression separately and not in the parapet has a resistance very close to the compression was obtained in the escarpment ranging from 108.63 kg / cm² to 164.78 kg / cm². So it was concluded that the materials as such have a similar to the old material resistance and decreased to 28.67 Kg / cm² in the low walls of new material is due to significant changes in the used mortar (mortar). Given that the strength obtained in the low walls of masonry (Representation to scale the cliff walls) do not reach even 30% of the resistance in the ancient escarpment, it is possible to conclude that these materials when work together have a very low resistance compared to the escarpment therefore, so it is determined that the restorations are not suitable carried out in this way with these materials.

KEYWORDS:

Mortar - Murete - Setting Test - Ultrasound - Escarpment - Walls - Cartagena

INTRODUCCIÓN

La maravillosa ciudad de Cartagena de Indias es también conocida como *la ciudad Heroica* o *el corralito de piedra*, este último distintivo precisamente haciendo honor a la colosal estructura que rodea todo el centro histórico de la ciudad. Cartagena es uno de los destinos turísticos más visitados en el mundo, en el 2014, Cartagena percibió un aumento en el número de visitantes extranjeros, que en promedio asciende a 147.280, lo que representa un incremento del 11,7 % con respecto al año anterior y por otro lado, el número de viajeros procedentes de destinos nacionales registraron un aumento de casi el 20% con respecto al año anterior, y que en número reales, se aproximan a 1 millón 300 mil visitantes (EL TIEMPO, 2014), lo que da un total de 1,447.280 visitantes que llegaron por vía aérea con fines turísticos a los que se deben sumar los 199 cruceros con un total de 309.698 pasajeros que arribaron en la ciudad (Puertos de Cartagena, Santa Marta y Providencia, 2014).

Teniendo en cuenta el gran volumen de personas que visitan Cartagena de Indias para conocer sus espectaculares atractivos históricos y culturales, donde no es secreto para nadie que el principal atractivo lo es el cordón amurallado que delimita el centro histórico de esta mágica locación, surge la necesidad de conservar en condiciones óptimas estos monumentos, para que la ciudad siga siendo catalogada como patrimonio histórico de la humanidad por la UNESCO y continúen funcionando como imán para los turistas que en gran parte son los que mueven la economía de esta región.

Con el paso del tiempo, los años le han cobrado factura a este monumento. Esto se ve reflejado en el deterioro de su escarpa, que no es más que la parte visible de la muralla conformada por piedras calizas pegadas con argamasa y cumple la función retener los materiales que conforman la contraescarpa (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena, 2010). El daño que se manifiesta en este elemento es causado por el desgaste ya que el contacto con las sales marinas genera una corrosión en las piedras que conlleva al desprendimiento y fragmentación de alguna de ellas.

Lo anterior motivó a que se realizaran estudios y restauraciones en algunas zonas del Cordón Amurallado regidas por el Distrito de Cartagena, la Sociedad de Mejoras Públicas, el Instituto de Patrimonio y Cultura de Cartagena (IPCC) y la Escuela Taller Cartagena de Indias,



quienes administran el patrimonio militar y tienen la total autonomía sobre algunos monumentos como el Castillo de San Felipe, el Cordón Amurallado y fortificaciones alrededor de la bahía de Cartagena. Se puede observar en parte de las murallas grietas sanadas con mortero, además de algunas piedras que contrastan con las antiguas. (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS MATERIALES PETREOS EXTRAIDOS EN TIERRABOMBA, 2014).

En investigaciones previas que tienen que ver con los materiales y la restauración de monumentos de valor histórico en la ciudad de Cartagena de Indias, se ha encontrado que en las canteras localizadas alrededor de la ciudad se obtiene un material con propiedades similares a las que poseen las piedras antiguas, así como también una investigación arrojó que de la cantera Coloncito, ubicada en el municipio de Turbaco a escasamente 20 minutos de Cartagena, se puede extraer un material que cuenta con las mejores propiedades de la zona, en cuanto a resistencia al desgaste y a la compresión. Cabe destacar que cada una de estas investigaciones se ha limitado a estudiar los materiales por separados, sin tener en cuenta que al momento de realizar las restauraciones estos materiales van a trabajar como una pieza monolítica con un comportamiento diferente.

Cumpliendo con los propósitos de esta investigación y el orden de ideas, primeramente se verificaron las propiedades de los materiales de las canteras aledañas a la ciudad y se encontró que el comportamiento de todos ellos es muy similar, sin embargo las muestras extraídas de la cantera Bonanza obtuvieron resultados ligeramente mejores en comparación con las canteras Coloncito y Constanza. Posteriormente se construyeron muretes a escala que representaron la escarpa de la muralla, estos elementos pétreos al funcionar como conjunto sólido se ensayaron a la compresión, los resultados se compararon con los de pruebas no destructivas realizadas “in situ” a la muralla, en este caso: Esclerómetro y Ultrasonido. Obteniendo así los parámetros que se usaron para comparar los resultados de resistencia a la compresión y poder concluir la investigación con la determinación del mejor material para las restauraciones futuras.



Este trabajo de grado, junto con ayuda del grupo de investigación *ESCONPAT* se enmarcó bajo la línea de Conservación y Consolidación de Monumentos, ya que en el proyecto en mención se estudiaron materiales que resultaron con propiedades comportamiento similares donde solo la cantera Bonanza es ligeramente mejor que las demás, independientemente de la cantera que se vaya a usar para restauraciones futuras se van a obtener comportamientos en la escharpa de las murallas que no serán diferentes según el origen del material, pues las diferencias son muy ligeras, dichas diferencias y demás datos de interés se podrán ver a continuación en la siguiente investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ESTADO DEL ARTE

A lo largo del tiempo se han realizado diversas investigaciones con el fin de encontrar una mejor forma de restaurar y mantener en condiciones óptimas los monumentos que poseen un gran valor histórico y patrimonial para la humanidad; utilizando como objeto de estos estudios las propiedades de los materiales que conforman cada uno de los monumentos, como son las resistencias a la compresión, flexión, desgaste y otras características particulares. A continuación se muestran algunos estudios realizados sobre la restauración y conservación de bienes patrimoniales con valor histórico.

Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizada en Chilpancingo, Gro (México), V. Flores, S. Sánchez-Tizapa, R. Arroyo y R. Barragán. Informes de la construcción. 2013

En este documento se presentaron los resultados de ensayos en especímenes de mampostería de tabique rojo recocido comúnmente usado para la construcción de muros de mampostería confinada en Chilpancingo. En total se hicieron 68 ensayos entre pilas y muretes, los valores medidos fueron la resistencia de diseño a compresión y cortante, los módulos de elasticidad y corte y la cohesión de la junta. También se obtuvieron expresiones para definir la curva Esfuerzo-Deformación en las pruebas de pilas y muretes.

De las piezas utilizadas en la construcción se tomó un lote de 15 para evaluar la resistencia a la compresión, en donde se obtuvo un valor medio de 8,7 MPa con coeficiente de variación de 0,23 y resistencia a compresión de diseño de 5,5 MPa. Las dimensiones promedios de las piezas fueron largo = 26,3 cm, ancho = 12,8 cm y alto = 5,0 cm. (Flores, Arroyo, & Barragan, 2013)

Para aparejar las piezas se utilizó mortero Tipo I con dosificación en volumen cemento-arena 1:3 y todos los protocolos de prueba usados en estos ensayos se ajustaron a la normativa mexicana.



Los resultados de los tres tipos de pruebas mencionados definen una parte del comportamiento de la mampostería, donde se presenta como la envolvente ante carga lateral y se presenta como una combinación de cuatro modos de fallo que son divididos en zonas.

En la Zona 1 se tiene menor resistencia ya que las juntas están sometidas a esfuerzos de tensión, este fenómeno se da en muros esbeltos. En la Zona 2, la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante excede la adherencia de las juntas, esto sucede en la mayoría de los muros de piezas huecas más resistente que el mortero. La Zona 3 indica falla por tensión diagonal y el parámetro de resistencia se obtiene en ensayos de muretes, este mecanismo de colapso generalmente ocurre en muros de mampostería confinada elaborados con piezas macizas. Por ultimo en la Zona 4 la falla ocurre por compresión exclusivamente, este fallo se presenta en muros de mampostería colocados al interior de marcos de concreto reforzado o acero.

En conclusión el ensayo a tensión diagonal en muretes es en México la prueba más común para evaluar mampostería; sin embargo, la información es insuficiente porque la envolvente de resistencia es una combinación de modos de falla. Por consiguiente se sugieren dos cosas: incorporar la prueba de adherencia a la normativa mexicana y modificar el espécimen de la prueba a compresión para inducir un estado de esfuerzos semejante al existente en muros sujetos a carga sísmica. (Flores, Arroyo, & Barragan, 2013)

Esta investigación se vio limitada en que hasta el día que se llevó a cabo no existía ninguna referencia local sobre las propiedades mecánicas más importantes utilizadas en el diseño y análisis del comportamiento, al contrario de lo que ocurre en otros lugares con mampuestos de piedra o adobe, por lo que para este trabajo se usan valores ingenieril definidos por normas externas.

Propuesta de intervención de las edificaciones patrimoniales de la ciudad de Matanzas en Cuba. Leidy Falcón Rodríguez. Universidad De Oriente, Facultad de Construcciones, 2010.

En esta investigación se realizó un estudio a las edificaciones de la comunidad de Matanzas, esta ciudad se encuentra ubicada en la zona occidental de la Isla de Cuba, esta ciudad tiene un valor arquitectónico y cultural de gran peso. Para llevar a cabo este trabajo se utilizó una metodología que consistía en realizar inspecciones a las edificaciones determinando así aspectos fundamentales de la misma y su entorno, además se trazan así las rutas a seguir para su diagnóstico de rehabilitación.

Se obtuvo primeramente un diagnóstico previo que permitía conocer las causas patológicas que originaron el proceso, su evolución y los posibles tratamientos. Este diagnóstico es indispensable para cualquier proceso de rehabilitación.

Sin embargo algunas de las limitaciones encontradas en la investigación fueron las inversiones de tiempo en el diagnóstico, ya que si no se hace lo correcto se debe volver a realizar o en el peor de los casos se procede de la forma incorrecta desperdiciando recursos, también se ve limitada por la gran revolución constructiva que tuvo la ciudad donde escasearon materiales y se trajeron de otros lugares, entonces es difícil dar un diagnóstico general en la investigación. La última limitación observada en la investigación que se llevó a cabo fue que algunos diagnósticos dieron como resultado la demolición total o parcial de algunos monumentos lo cual va en contra de la conservación del patrimonio cultural de una ciudad famosa por alto valor histórico. (Falcon Rodriguez, 2010)

Estudio de los efectos de la disolución kárstica y la erosión, en las obras patrimoniales de la “Villa de San Cristóbal de la Habana. Evelio J. Balado Piedra, Ernesto Flores Valdés - Cuba Arqueológica, 2004.

En la isla de Cuba en la mayoría de las grandes construcciones que se ejecutaron a partir del siglo XVII, se utilizó como material fundamental los bloques de roca carbonatadas, desde calizas hasta margas, las cuales eran conocidas como Cantos de Piedra.

En el presente trabajo se hizo un análisis “in situ” preliminar de las formas de alteración que más inciden en los muros, paredes y techos de una serie de construcciones consideradas como patrimoniales de la ciudad de la Habana, se evalúa el grado de afectación de dichas construcciones a partir de la distancia de la línea costeras y en algunos de la acción directa del oleaje marino, también se hace en esta investigación un análisis del grado de afectación de cada roca en dependencia de la formación geológica a la que pertenecen.

Anterior al trabajo de campo, en el curso de la investigación bibliográfica se logró identificar las principales canteras suministradoras de bloques de caliza para las construcciones de la Habana, aunque con el paso de los años algunas ya se habían agotado y dejado de existir y se explotaron otras canteras, también gracias a las observaciones en las búsquedas bibliográficas, se pudo determinar de forma aproximada, la velocidad de los procesos erosivos desarrollados en las edificaciones, resulta muy interesante como en la investigación se comprueba que la pérdida de repello de las fachadas y muros de construcciones ha sido determinante en la mayoría de los casos, para que sobre los mismos se desarrollaran procesos erosivos, mientras que en otros casos la porosidad intrínseca de la roca en combinación con el pésimo estado de los techos y paredes, favoreció a que en algunos casos estos muros funcionen como verdaderos micro acuíferos percolantes generando muchos daños en los inmuebles, tales como: paredes resumantes, desmoronamientos, asentamientos y fracturas.

La investigación dio como resultado la identificación del proceso de micro karstificación urbana, además estos procesos se han venido acelerando e intensificando producto de la actividad antrópica que combinado con la falta de mantenimiento en las obras patrimoniales es un factor que termina de acelerar estos procesos erosivos. Se recomienda aplicar esta metodología evaluativa a todas las obras de valor patrimonial construidas con rocas calizas o recubiertas con planchas de rocas calizas o similares.

Dicha investigación se vio limitada por algunas políticas de conservación del patrimonio que no permitieron tomar una mayor cantidad de muestras para establecer un estudio más detallado, además cabe mencionar que en algunas obras patrimoniales era casi imposible tomar las muestras para el estudio pues se encontraban en contacto directo con el mar, por lo que se tomaron muestras de casas particulares cercana a las estructuras teniendo en cuenta que estaban construida con materiales iguales que databan de la misma fecha. (Evelio & Flores Valdes, 2004)

Current Methods And Future Trends In Testing, Durability Analyses and Provenace Studies Of Natural Stones Used In Historical Monuments.(Budapest, 2010)

En la presente investigación se resumieron las técnicas disponibles hasta el año de finalización de la misma para llevar a cabo ensayos en laboratorio así como en el sitio, de las piedras naturales que son usadas comúnmente en monumentos históricos.

Se usaron en este trabajo estudios de diagnósticos no destructivos y bajo-destructivos en el sitio de las pruebas para así comprender el comportamiento de las rocas en condiciones naturales. Se enfatizó en el uso de las fuentes de datos adecuadamente y los resultados de largo plazo en las pruebas de evaluación del comportamiento.

La correcta combinación de los análisis tanto de campo como de laboratorio permitió la identificación de los litotipos y las debilidades asociadas a la mineralogía y estructura de las piedras. Aseguraron que las propiedades físicas que influyen la durabilidad de las piedras están gobernadas por las piedras mismas pero también están influenciadas por factores externos como la exposición a diversas condiciones ambientales. Tales condiciones, podrían invocar nuevos enfoques en la conservación de las rocas y en los cuidados que se deben tener en los análisis y experimentos tanto en el laboratorio como en el sitio los cuales estimulan procesos de meteorización y mecanismos de deterioro.

Fue necesario generar información clara para aquellas personas o entidades que tomaran las decisiones, para juzgar la pertinencia y el tipo de intervención a realizar, puesto que desde el concepto de la intervención es mejor salvaguardar las piedras históricas, pero se concluyó

que hay casos donde es necesario usar nuevos materiales o piedras de repuesto con el fin de prolongar la vida útil de la estructura.

La investigación se limita en la mención de que es muy difícil predecir el futuro de las piedras en los monumentos, pero que gracias a las técnicas que se han venido desarrollando en otros campos tecnológicos como la medicina y las investigaciones espaciales, que aportaran herramientas que llevaran a un diagnóstico más acertado en un futuro. (Torok & Priktyl, 2010).

Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias. José F. España Moratto, Esteban J. Puello Mendoza y Edilber E. Almanza Vásquez. (Universidad de Cartagena, 2009).

Este trabajo determina empíricamente la resistencia de distintas mezclas de piedra coralina, piedra de coral, ladrillos tipo tableta militar y argamasa que actúa como material cementante, con el fin de normalizar la mampostería de tipología colonial usada en las construcciones antiguas de la ciudad de Cartagena de Indias. Se determinaron las propiedades estructurales de los cuatro tipos de muros que se encuentran en las edificaciones coloniales, obteniendo así parámetros estructurales que servirán para evaluar sus capacidades de carga y el factor de corrección que afecta la resistencia teórica calculada de los muros respecto a la resistencia experimental.

Mediante esta investigación se establece teóricamente la mejor composición de las proporciones de los materiales de las mezclas, desde el punto de vista de las estructuras coloniales. La evaluación de la resistencia en cada uno de los cuatro tipos de mampostería colonial se con base en los resultados de los ensayos de argamasa en las proporciones 1:1, 1:2 y 1:3 de cal y arena, así como también los obtenidos para piedra coralina, ladrillo o tableta militar y piedra de coral, realizados por los ingenieros Antonio Cogollo A, Jairo Martínez Llamas y Rafael Ruiz Arango (Químico).

El análisis dio como resultado que cuando la argamasa se prepara en proporción 1:1, la resistencia del ciclópeo es ligeramente mayor que cuando se prepara en proporción 1:2 y esta es ligeramente mayor a la preparada en proporción 1:3, lo que indica que a mayor proporción de arena en la argamasa, la resistencia del ciclópeo disminuye, esto debido a que los espacios

entre los granos de arena son llenados por la cal, también arrojó como resultado que a menor cantidad de argamasa que mezcla de agregados en el ciclópeo, la resistencia a la compresión es mayor, debido a que la resistencia total es proporcional a las resistencias parciales y al tener los agregados gruesos mayor resistencia y mayor participación se tiene un mejor resultado.

De igual manera en esta investigación se puede observar, que las mayores resistencias en los ciclópeos se obtiene con las mezclas de agregado grueso que presentan mayores resistencias proporcionales y estas resistencias se presentan en las combinaciones que poseen mayor porcentaje de ladrillo o tableta militar, independiente de los porcentajes de piedra de coral y piedra coralina.

Al momento de concluir esta investigación se vio limitada en varios aspectos uno de ellos fue el tiempo de fraguado de la argamasa que al ser bastante extenso en días y depender mucho de la porosidad de la roca en que se iba a aplicar era un dato variable en el que era complicado tener un dato exacto, además de solo usarse tres relación para su mezcla. Cabe destacar que en esta investigación se trabajan varios tipos de materiales de forma muy general sin adentrarse de lleno en alguno (España Moratto, Puello Mendoza, & Almanza Vasquez, 2009)

Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales disponibles en el departamento de Bolívar para restaurar las murallas en la ciudad de Cartagena de Indias. Mario Alonso Meza Flórez y José David Cohen Rhenals, Universidad de Cartagena 2012

En este proyecto se determinan las propiedades físicas y mecánicas de los principales materiales disponibles actualmente en el departamento de Bolívar para la restauración de dichas fortificaciones, esta investigación se derivó en gran parte por el enfrentamiento de tipo cultural entre la ciudadanía y los administradores de estas estructuras, puesto que se han realizado cambios para que sean usadas como servicios públicos o higiénicos, además de que el daño que se causa al patrimonio histórico de la ciudad no es solo destructivo y corrosivo, sino que también se ha tenido un efecto visual, estético y ambiental.



Con el fin de evitar un exceso de gastos en restauraciones, esta investigación arrojó como resultados que el material más duradero y con mejores propiedades físicas y mecánicas fue el material extraído de la cantera Coloncito ubicada en el municipio de Turbaco.

Además se encontró que en el ordenamiento jurídico no existen normas o disposiciones legales que regulen los materiales utilizados para la restauración de estos monumentos, la inexistencia de este tipo de normativas está dejando que muchas edificaciones pierdan su valor histórico paulatinamente, además del gasto excesivo de dinero en constantes restauraciones.

Este trabajo investigativo se vio limitado en el número de canteras analizadas a causa de falta tiempo y recursos económicos para llevar una investigación más profunda, donde también se debe tener en cuenta que quizás la cantera con mejores propiedades en sus materiales ya fue cerrada y se prohibió la explotación de materiales, a lo que se debe agregar que solo experimentaron los materiales por separados para llegar a una conclusión donde no se tuvo en cuenta el comportamiento en conjunto. Por lo tanto no se puede determinar cuál material es mejor para la restauración ya que cada material no va a estar aislado sino que trabaja como un miembro rígido. (Meza & Cohen, 2011)

Estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena de Indias (Baluarte de Santiago). Cristian Ignacio Buendía Atencio, Aida Liliana Barbosa López. Universidad de Cartagena

En la presente investigación se mostraron los resultados preliminares que caracterizaron de forma fisicoquímica el material pétreo constituyente de las murallas de Cartagena (Baluarte de Santiago) y de muestras de materiales de la cantera de Turbaco. Cada una de las muestras se analizó por rayos X, difracción de rayos X, fluorescencia y ensayos de cloruros por potenciómetro. Con lo que se pudo determinar que las rocas se encuentran como calcita mineral ya que sus difractogramas coinciden con los patrones encontrados en las bases de datos consultadas, según su caracterización fisicoquímica se obtuvo una disminución de la concentración de calcio del 5% por parte de la roca antigua respecto al de la roca de la cantera, esto se debe al ambiente agresivo en que se encuentran en las murallas. Además se encontró

un aumento de 187,5% en Azufre, 75% en Silicio y 148,7% en cloruros, estos datos en la roca antigua con relación a los de la cantera, lo que demuestra su deterioro en la composición química y mineralógica del material pétreo que conforma las murallas de la ciudad de Cartagena de indias.

Al comparar el material pétreo antiguo de las murallas solo con la cantera ubicada en Turbaco se limitó a un solo tipo de roca, teniendo en cuenta que la ciudad de Cartagena de Indias se encuentra rodeada de muchas canteras que también pueden ser usadas como patrón comparativo para determinar el deterioro del material antiguo. (Buendía Atencio & Barbosa López, 2006)

Estudios de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de Tierra Bomba para comprobar su uso en la construcción de las murallas de Cartagena de Indias y compararlo con el utilizado actualmente su restauración proveniente de la cantera “Coloncito” en Turbaco. Genis Paola Fernández Torres y Sandra Patricia Palencia Cantillo. Universidad de Cartagena. 2014.

Según los conocedores del tema los monumentos históricos de la ciudad de Cartagena fueron construidos con materiales obtenidos de canteras cercanas, en especial su cordón amurallado, por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue confirmar este hecho y demostrar que el material utilizado para la construcción de las murallas era proveniente de la isla de Tierra Bomba.

Por lo que se compararon las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas y el utilizado para su restauración, y comprobar si dicho material es óptimo para restaurar este tipo de obras.

Como resultado de esto, se encontró que el material extraído de canteras de Tierra Bomba es 63,44% menos resistente que el de coloncito y coincide solo con la zona 3 de las murallas, (Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier), con una resistencia a la compresión de 110,52 kg/cm² y porcentaje de desgaste del 33,70 %. La diferencia porcentual entre densidades es de 1,43% y 0,25% para la porosidad total. El material de Coloncito coincide

con la zona 2, (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago), con diferencias porcentuales de densidades de 1,75%, resistencia a la compresión 6,99% y porosidad total de 1,75%.

Estos resultados confirman la utilización del material de la isla de tierra bomba en la construcción de las murallas de Cartagena de Indias y avala la utilización del material de “Coloncito” para obras de restauración.

Sin embargo la investigación se limita a una conclusión basada en pocos parámetros, que son ciertos, pero para llegar a una respuesta de tal magnitud se deben tener en cuenta propiedades más complejas de los materiales. (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, 2014)

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Historia De Cartagena De Indias

Cartagena de Indias nació de las aguas. De ahí que la abundante cartografía de la Cartagena colonial la asocie a su bahía. Irónicamente, la falta de agua fue también su talón de Aquiles. El madrileño Pedro de Heredia, su fundador, desembarcó el 14 de enero de 1533 en un poblado indígena deshabitado de la isla de Calamarí. Los indios debieron abandonar sus bohíos apenas avistaron las velas del conquistador henchidas por los suaves alisios imperantes. Habían sufrido mucho a manos de los cazadores de esclavos que precedieron a don Pedro. La bahía, descubierta por Alonso de Ojeda en 1501, ya tenía nombre: Cartagena. (Alcaldía de Cartagena, 2015)

A Heredia le disgusta el lugar: carece de agua corriente. A poco de llegar, comanda él mismo una expedición hasta el río Grande de la Magdalena, en busca de un lugar más apto. Quizá sueña con encontrar otra rada como la de Santa Marta, que conocía a orillas del río Manzanares. Defraudado, regresa a Calamarí. Empero, apremia fundar una cabecera que consolide su gobernación y urge, al mismo tiempo, cumplir con lo estipulado en las Capitulaciones que había firmado en 1532. Bajo presión el madrileño procede a instalar formalmente su Cartagena de Poniente 1º de junio de 1533, que bautiza con ese nombre para

distinguirla de la otra, la Cartagena de Levante en España, de prosapia fenicia y cartaginesa (Segovia, 2015).



Ilustración 1. Plano de la ciudad de Cartagena, 1735.

Fuente: (<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/noviembre2001/cartagena.htm>) [Consultado: 12, abril, 2015]

La prosperidad de Cartagena de Indias atrajo el interés de los piratas. Y los primeros ataques de piratas fueron por el Francés Roberto Baal. En el curso de los años próximos, Cartagena conoció numerosos ataques por Juan Hawkins, los hermanos Juan y Martín Côté, y de Francis Drake. En consecuencia de estos ataques, una muralla y fuertes fueron construidos alrededor de la ciudad. Cartagena se hizo la ciudad más protegida de América del Sur. Españoles concibieron los fuertes, las baterías y los castillos gracias a la ingeniosidad de sus arquitectos y los italianos. Finalmente, el trabajo ha sido hecho por los esclavos africanos.

En 1610 llegarían los primeros frailes del Tribunal de Penas del Santo Oficio de la Inquisición, que extendería su poder de reprensión y vigilancia hasta la época de la Independencia (Cartagena, 2015).

Cartagena de Indias fue en ocasiones sede de virreyes, como Don Sebastián de Eslava, que gobernó durante casi diez años seguidos, reemplazando a Santa Fe como capital del Nuevo Reino de Granada (Cartagena-Caribe, 2013).

El 11 de noviembre de 1811 se firmaría el Acta de Independencia Absoluta de España, comenzando con esto 10 largos años para lograr la emancipación definitiva. De los muchos bloqueos y sitios que sufrió la Villa de Heredia, cabe destacar el impuesto por Pablo Morillo, El Pacificador, en 1815, quien tenía el objetivo de recuperar esta importante plaza para la Corona Española. "Cartagena de Indias, Ciudad Heroica", fue el título que se ganaría luego de soportar más de tres meses de intenso cerco.

En la época republicana la ciudad entraría en un largo período de estancamiento, producto de su pérdida de interés estratégico y comercial. Se puede citar a Rafael Núñez, cartagenero que durante esta época de "recesión" de Cartagena de Indias, fuera elegido Presidente de la República en cuatro ocasiones, dirigiendo los destinos de la Nación desde la Heroica, como en la Colonia lo hicieran algunos virreyes.

El renacer de Cartagena de Indias como ciudad determinante en Colombia se da entrado el Siglo XX con la reactivación de su economía, cuando su historia y sus leyendas son sólo recuerdos del pasado glorioso de una ciudad turística que recibe el Siglo XXI llena de esperanzas y sueños para el futuro. (Cartagena, 2015)

1.2.2 Murallas de Cartagena de Indias

La Muralla de Cartagena de Indias fue construida para la defensa de la ciudad, se inició a finales del siglo XVI después del ataque del legendario Sir Francis Drake. La fortificación es la más completa del continente América del Sur y una de las mejores y bien conservadas murallas de las ciudades amuralladas del mundo y ha sido declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

La ciudad de Cartagena fue asaltada numerosas veces por piratas y tropas inglesas, francesas y holandesas. Por esta razón el Rey Felipe II encomendó la misión al mariscal de campo Luis

de Tejada y al ingeniero italiano Bautista Antonelli construir 11 km de murallas y fuertes que sirvieran de defensa a la ciudad.

La construcción fue realizada por etapas. La primera de ellas se inició en 1586 por Bautista Antonelli, que era un ingeniero italiano que estaba al servicio de la corona española, posteriormente en 1609 Cristóbal Roda vendría a intervenir en la construcción logrando la fortificación de toda la parte de la ciudad que da al mar abierto. Francisco de Murga fortaleció toda la parte del barrio Getsemaní del año 1631 al año 1633, posteriormente Juan Betín reparó las murallas destruidas por el mar en 1669. Luego de deterioros serios por parte del mar y del ataque a la ciudad por parte del Barón de Pointis, Juan de Herrera y Sotomayor reinició las reparaciones de las murallas. En este momento el virrey de Villalonga ordena a Herrera construir cajones submarinos para así formar una escollera frente a las murallas destruidas en 1721. Era necesaria la construcción de otra escollera en el trayecto entre la punta Icacos (cerca al actual Hotel Caribe) y Tierrabomba por parte de Antonio de Arévalo que era el ingeniero más importante que tenía la ciudad. En el año 1796 se terminaría las obras en el centro de la ciudad.

Los recintos de la muralla tenían también la función de separar a la gente rica y a la gente pobre que podía solamente entrar para venir a trabajar en la ciudad. Las murallas son complementadas por fortalezas sobre la costa como el fuerte de San Sebastián del Pastelillo y el Fuerte de San Fernando de Bocachica. (GuíaTodo Colombia, 2013)

1.2.2.1 Historia de las Murallas de Cartagena

Son el ejemplo mejor conservado de una plaza fuerte abaluartada en todo el Caribe. Ni Cuba, ni Puerto Rico, ni Veracruz, ni Portobello, conservan casi intactas las fortificaciones militares construidas durante varios siglos coloniales, siguiendo los diseños de los ingenieros al servicio de la Corona española. (Meisel, *Las murallas de Cartagena*, 2006). Su construcción representó un enorme esfuerzo económico por parte de las provincias de Nueva Granada, Ecuador y el virreinato de Perú que fueron las que las financiaron con sus transferencias



fiscales, o situados, como se conocían esas transacciones. También ayudaron a sufragar la compra o el alquiler de los miles de esclavos que trabajaron en su construcción, así como para cubrir los gastos de su manutención. Aunque la leyenda que dice que las piedras de las murallas de Cartagena se pegaron con cal y sangre de los esclavos no es cierta, en un sentido menos literal sí lo es, ya que esto hace referencia al duro trabajo de los esclavos y de los que trabajaron hasta desfallecer.

La enorme carga que en las últimas décadas del período colonial representaron las inversiones en las murallas de Cartagena para un Virreinato muy pobre, como lo era el de la Nueva Granada, prepararon el terreno para la independencia. La Revolución Comunera de 1781 fue una rebelión de los neogranadinos en contra de los esfuerzos de la administración Borbónica para elevar los recaudos tributarios. Después de pagar por los gastos de funcionamiento del gobierno colonial, por las obras militares y a las tropas de Cartagena, no quedaba casi nada para enviar a España. Esto último era inaceptable para las autoridades de Madrid. Por eso pretendían aumentar los recaudos. Pero la creación de más impuestos llevó a una insatisfacción con la administración virreinal y a la rebelión de los comuneros.

En 1741, las murallas y fortificaciones de Cartagena ayudaron a derrotar la armada inglesa, comandada por el almirante Edward Vernon, que atacó la ciudad. La flota inglesa estaba compuesta por más de 180 navíos de guerra y transporte y trajo casi 26.000 hombres. Pero detrás de las murallas, los cartageneros resistieron. Uno de sus comandantes era el célebre Blas de Leso, quien murió como consecuencia de las heridas recibidas durante los bombardeos ingleses, y el virrey Eslava. Luego las murallas sirvieron para que los cartageneros rechazaran durante más de tres meses el sitio que Pablo Morillo les impuso para reconquistar la ciudad en 1815. Ese sitio llevó a que miles de patriotas de todas las edades murieran de hambre. Pero no se rindieron. Cientos de defensores de Cartagena, tal vez unos 2.000, se embarcaron en navíos en el muelle de la ciudad para desafiar el cerco español. Al pasar por el fuerte de Bocachica recogieron a los defensores de ese fuerte, los cuales, al retirarse, arriaron la bandera del Estado Soberano de Cartagena y se la llevaron hacia el exilio. Muchos nunca regresaron. Pero algunos sí lo hicieron, aunque fuera para morir en la lucha por recobrar su ciudad.



Como fue el caso de Juan Antonio Arias, quien murió en 1821 en las acciones de recuperación de la plaza por parte del Ejército Libertador bajo el mando del general Mariano Montilla. Arias fue uno de los firmantes del Acta de Independencia de Cartagena del 11 de noviembre de 1811. Luego se marchó al exilio en 1815 y regresó con el Ejército patriota en 1821. Murió en un combate en el Cerro de la Popa, unos días antes de que los españoles se rindieran y abandonaran para siempre a Cartagena.

Después de la independencia vendría el abandono de las murallas, pues ya no tenían casi ningún valor militar. En los últimos años del siglo XIX se le agregó a la puerta de entrada de la ciudad una torre neogótica con un reloj, la Torre del Reloj, que se ha convertido en uno de los símbolos más reproducidos de la ciudad y del país. Ya muchos no recuerdan que debajo de esa torre estaba la única entrada al casco urbano de Cartagena. En los albores del siglo XX, cuando estas se encontraban en lamentable estado de abandono, el Tuerto López escribió: "Pues ya pasó ciudad amurallada tu edad de folletín". Pero unas pocas décadas después vendrían los grandes flujos de turistas, quienes siempre buscan las murallas para fotografiarse en ellas, o para caminar por encima de estas mientras divisan el mar y la ciudad desde lo alto, o simplemente para admirar sus pétreas estructuras. Están pisando sobre las piedras que con sudor y sangre defendieron los cartageneros en diferentes épocas. Aún hoy es necesario defenderlas.

Las Murallas de Cartagena de Indias fueron construidas para la defensa de la ciudad, se inició a finales del siglo XVI después del ataque del legendario Sir Francis Drake. La fortificación es la más completa del continente América del Sur y una de las mejores y bien conservadas murallas de las ciudades amuralladas del mundo y ha sido declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Desde la fundación de Cartagena en 1533, y durante toda la época colonial española, fue uno de los puertos más importantes de América. De allí salían las mayores riquezas que la Corona Española enviaba a sus puertos en España por tal razón era preciso construir una muralla con todos los fuertes como El Castillo de San Felipe y Bocachica para evitar que fueran invadidos por los ingleses o franceses o saqueros por los piratas, así el puerto de Cartagena fue cobrando importancia gracias a su bahía protegida por

los militares españoles, la construcción de los fuertes y murallas y a su cercanía con la ciudad de Panamá otro puerto español importante.

La ciudad de Cartagena fue asaltada numerosas veces por piratas y tropas inglesas, francesas y holandesas. Por esta razón el Rey Felipe II encomendó la misión al mariscal de campo Luis de Tejada y al ingeniero italiano Bautista Antonelli construir 11 km de murallas y fuertes que sirvieran de defensa a la ciudad. (Guía todo, Murallas de Cartagena, 2010).



Ilustración 2. Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena Fuente: (Semana.com, 2012)

Actualmente la parte de las murallas de Cartagena de Indias que se encuentra en pie, tiene un uso abierto al público en general con fines turísticos, recibiendo aproximadamente 1 millón y medio de visitante de todas partes del mundo. (Puertos de Cartagena, Santa Marta y Providencia, 2014).

Además, en las murallas de Cartagena se pueden hacer eventos públicos y privados, siguiendo unos parámetros establecidos por la Sociedad de Mejoras Publicas de Cartagena los cuales están basados en un marco legal vigente en el que se establecen disposiciones de

uso de los espacios públicos y la competencia de la Secretaría del Interior y Convivencia para otorgar la autorización para que allí se realicen espectáculos públicos.

La Sociedad de Mejoras Públicas de Cartagena (SMPC), en cumplimiento del Contrato No. 005-92, tiene la facultad legal para otorgar los permisos que autorizan el uso temporal de las murallas, conforme a lo dispuesto en las normas urbanísticas vigentes y en la reglamentación definida en este Manual. La SMPC establecerá las actividades capaces de generar ingresos, las normas que regirán el uso y la vigilancia sobre los usuarios para garantizar el cumplimiento del contrato y la correcta administración del bien.

También se aclara que cualquier persona natural o jurídica podrá solicitar el aprovechamiento económico de cualquiera de los espacios destinados para tal fin en las murallas de Cartagena, con la condición de que cumpla con las directrices que para tal fin se determinan en el presente Manual y que presente su solicitud con una antelación no menor a 20 días hábiles. Si se trata de un evento organizado por entidades del orden distrital o nacional, el solicitante deberá cumplir igualmente con los trámites establecidos. (Ministerio de Cultura, 2007)

1.2.2.2 Etapas de Construcción de las Murallas

La construcción del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena de Indias fue realizada en varias etapas. (Revista SEMANA, 2012)

- 1) La primera de ellas se inició en 1586 por Bautista Antonelli, que era un arquitecto militar italiano que estaba al servicio de la corona española, posteriormente en 1609 Cristóbal Roda vendría a intervenir en la construcción logrando la fortificación de toda la parte de la ciudad que da al mar abierto.
- 2) Francisco de Murga fortaleció toda la parte del barrio Getsemaní del año 1631 al año 1633.

- 3) Posteriormente Juan Betín reparo las murallas destruidas por el mar en 1669. Luego de deterioros serios por parte del mar y del ataque a la ciudad por parte del Barón de Pointis, Juan de Herrera y Sotomayor reinicio las reparaciones de las murallas.
- 4) En este momento el virrey de Villalonga ordena a Herrera construir cajones submarinos para así formar una escollera frente a las murallas destruidas en 1721. Era necesaria la construcción de otra escollera en el trayecto entre la punta Icaos (cerca al actual Hotel Caribe) y Tierrabomba por parte de Antonio de Arévalo que era el ingeniero más importante que tenía la ciudad.
- 5) En el año 1796 se terminaría las obras en el centro de la ciudad.

1.2.3 Materiales Pétreos

Son aquellos materiales que se extraen directamente de la naturaleza no necesitando para su empleo nada más que darles la forma adecuada. Dentro de estos materiales tenemos dos tipos. Aquellos materiales que se extraen de los macizos rocosos, es decir, las rocas, que aparecen en cierta extensión. La erosión de las rocas, transporte de materiales, sedimentación de los mismos da lugar al otro tipo de materiales, a los denominados materiales o sustancias granulares o granos, lo que conocemos como arcillas, arenas, gravas, etc.

Tanto las rocas como los materiales granulares están constituidas por la asociación de minerales o cuerpos de la misma composición química y forma cristalina. Esos minerales pueden ser minerales principales (en mayor proporción) y minerales secundarios. (Crespo Escobar, 2009)

1.2.3.1 Propiedades de los Materiales Pétreos

- **Densidad.** Suele estar comprendida entre 2-3g/cm³. En la densidad van a influir los minerales integrantes del material así como el % del volumen de huecos.

La densidad (ρ) se define como la masa (M) por unidad de volumen (V), y se expresa en Kg/m³.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Determinada la masa y el volumen de una muestra rocosa, se conoce de forma inmediata su densidad. En los materiales porosos tanto la masa como el volumen admiten ciertas matizaciones y, en consecuencia, se pueden establecer distintos tipos de densidad. Fundamentalmente se distingue dos: "densidad de los granos minerales" y "densidad de la roca seca". También pueden considerarse otros tipos como la "densidad de la roca húmeda".

La densidad de los granos minerales (ρ_s), conocida también como densidad de la fracción sólida, densidad real o densidad verdadera, se define como la masa de material seco (M_s) por unidad de volumen de la parte sólida de la roca (V_s), es decir, el volumen después de ser excluidos sus espacios vacíos:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

Su valor puede calcularse de forma teórica a partir de la densidad de los minerales constituyentes, siempre que se conozca con precisión la composición cuantitativa de la roca y la densidad de cada componente (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, Estudio De Las Propiedades Fisicas Y Mecanicas De Los Materiales Petreos Extraidos De La Isla De Tierrabomba. , 2014).

MINERAL	DENSIDAD (g/cm ³)
Cuarzo	2.65
Ortosa	2.55 - 2.63
Plagioclasa	2.63 – 2.74
Moscovita	2.7 – 2.8
Biotita	2.8 – 3.2
Ilita	2.6 – 2.66
Caolinita	2.61 – 2.68
Montmorillonita	2.65 – 2.84
Calcita	2.72
Dolomita	2.86
Yeso	2.3 – 2.37

Tabla 1 Densidades de los principales minerales formadores de roca

Fuente: (Ciencia del suelo. 2007)

- **Porosidad.** La porosidad es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos que posee una roca y se define como la fracción del volumen total de la roca que corresponde a espacios que pueden almacenar fluidos.

$$n = \frac{\text{Volumen de espacios para almacenar fluidos}}{\text{Volumen Total}} \quad (3)$$

Como el volumen de espacios disponibles para almacenar fluidos no puede ser mayor que el volumen total de la roca, la porosidad es una fracción y el máximo valor teórico que puede alcanzar es 1. Muchas veces la porosidad es expresada como un porcentaje.

(Fernandez Torres & Palencia Cantillo, Estudio De Las Propiedades Fisicas Y Mecanicas De Los Materiales Petreos Extraidos De La Isla De Tierrabomba. , 2014)

La porosidad de una roca puede ser clasificada de dos maneras:

- **Según su origen:** Puede ser clasificada en primaria o intergranular y secundaria o inducida. La porosidad primaria o intergranular es aquella que se origina durante el proceso de deposición de material que da origen a la roca. Por otra parte la porosidad secundaria es aquella que se origina por algunos procesos naturales o artificiales posteriores al momento en el cual los sedimentos que dieron origen a la roca fueron depositados. En general las rocas con porosidad primaria presentan características más uniformes que aquellas que presentan parte de su porosidad secundaria o inducida. Algunos procesos que dan origen a la porosidad secundaria de una roca son:
 - 1. **Disolución:** Es un proceso mediante el cual se origina una reacción química entre los fluidos que saturan el medio poroso y la matriz de la roca. Este proceso origina una modificación en el volumen poroso del sistema y por ende en la porosidad.
 - 2. **Fracturas:** Contribuyen a la generación de porosidad secundaria. Después de producirse la deposición de sedimentos y originarse la roca, esta se puede encontrar sometida a procesos geológicos de deformación originados por actividades tectónicas que pueden generar fisuras o desplazamiento de los granos que conforman la matriz de la roca. Estas fracturas originan un aumento en el volumen de espacios que pueden contener fluidos, lo que se traduce en un aumento en la porosidad.
 - 3. **Dolomitización:** Proceso mediante el cual la caliza se transforma en dolomita. El proceso de dolomitización ocurre cuando rocas carbonáticas entran en contacto con agua que circula a través del medio poroso. Al entrar en contacto

el magnesio desplaza al calcio, y debido a que el magnesio es considerablemente más pequeño que el calcio, la roca generada luego del desplazamiento puede presentar una porosidad mucho mayor.

- **Según la comunicación de sus poros:** Debido a que el material cementante puede sellar algunos poros de la roca, aislándolos del resto del volumen poroso, los poros se pueden encontrar unidos entre sí, o aislados. Dependiendo de cómo sea la comunicación de estos poros, la porosidad se puede clasificar de la siguiente manera:

1. **La porosidad total o absoluta** de una roca se define como la fracción del volumen total de la misma que no está ocupada por matriz. Conocida la densidad de los granos minerales (ρ_s) y la densidad de la roca seca (ρ_d), la porosidad total (n) se calcula a partir de la expresión:

$$nt = \frac{pr - pa}{pr} \times 100 \quad (4)$$

Porosidad muy baja	menor de 4 %
Porosidad baja	De 4 a 8 % (valor medio alrededor de 6 %)
Porosidad media	De 8 a 16 % (valor medio alrededor de 10 %)
Porosidad alta	de 16 a 32 % (valor medio alrededor de 20 %)
Porosidad muy alta	mayor de 32 %

Tabla 2. Clases de Porosidad

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

2. **La porosidad interconectada o efectiva** se define como el volumen total de la roca que representa espacios que pueden contener fluidos y se encuentran comunicados entre sí, mientras que la porosidad no interconectada o no efectiva es aquella que representa la fracción del volumen total de la roca que

está conformada por los espacios que pueden contener fluidos pero no están comunicados entre sí.

3. Como la sumatoria del volumen de los *poros no interconectados* más el volumen de los poros interconectados es igual al volumen total de los poros de la roca, entonces la porosidad absoluta o total del sistema es igual a la sumatoria de la porosidad efectiva más la porosidad no efectiva.
- **Calidad de la roca en función a la Porosidad.** Como la porosidad es una medida de la capacidad de almacenamiento de la roca, la calidad de la roca puede ser determinada en función a la porosidad, como se observa en la tabla mostrada a continuación. (Da Silva, 2010).

Calidad	Φ (%)
Muy buena	> 20
Buena	15 – 20
Regular	10 – 15
Pobre	5 – 10
Muy pobre	< 5

Tabla 3. Calidad de la roca en función de la porosidad

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

MATERIAL	DENSIDAD GLOBAL (kg/m^3)	POROSIDAD (%)
Granito	2600-2800	0.15-1.5
Gabro	3000-3100	0.1-0.2
Riolita	2400-2600	4.0-6.0
Basalto	2800-2900	0.1-1.0
Arenisca	2000-2600	5.0-25.0
Lutita	2200-2400	10.0-30.0
Caliza	2200-2600	5.0-20.0
Dolomía	2500-2600	1.0-5.0
Gneiss	2900-3000	0.5-1.5
Mármol	2600-2700	0.5-2.0

Tabla 4. Densidad global y porosidad de rocas usadas en construcción.

Fuente: (La comunidad petrolera)

- **Durabilidad.** Es el período de uso sin deteriorarse y perder sus propiedades. La durabilidad es alta y pueden durar inalterables durante cientos de años. La estructura del material no se altera por la acción de los agentes exteriores (lluvia, viento, heladas, CO₂), solo se modifica la capa más superficial.
- **Dureza.** Es la resistencia al rozamiento, rayadura, penetración. La dureza de los materiales pétreos depende de la dureza de los minerales que tengan y de la cohesión de la masa de dichos materiales. Para determinar la dureza de los materiales se utiliza la escala de Mohs, ordenándolos del más blando al más duro.
- **Resistencias mecánicas.** Tienen muy buena resistencia a compresión (contracción). Se cree que a mayor densidad mayor resistencia a compresión. En cambio tienen baja resistencia a tracción (estiramiento) y baja resistencia a flexión (tracción y compresión simultáneas).
- **Propiedades térmicas.** Bajo coeficiente de conductividad térmica. Baja conducción del calor o el frío. Sin embargo cuando los materiales pétreos tienen humedad, su conductibilidad aumenta ligeramente. Las dilataciones o

contracciones térmicas solo afectan a la capa superficial, mientras que la masa interna apenas sufre deformación por efecto de la temperatura.

- **Propiedades eléctricas.** Los materiales pétreos conducen mal la electricidad, el coeficiente de conductividad eléctrica es muy bajo, aunque en presencia de humedad suele aumentar considerablemente.
- **Impermeabilidad.** Dependiendo del tipo de material pétreo la permeabilidad al agua variará. A mayor cantidad de poros en el material mayor será la permeabilidad. Además, la circulación del agua a través de los poros va aumentando el tamaño de éstos al desgastarlos por erosión. A veces el agua lleva partículas en suspensión o disueltas y pueden contribuir a cerrar parte de los poros y disminuir la permeabilidad. Si el material no tiene poros será impermeable.
- **Resistencia a la intemperie.** Por ser un material natural, la resistencia a los agentes exteriores es muy alta. Como se sabe, hay multitud de construcciones con piedras o rocas desde hace cientos de años que se mantienen en muy buen estado. El agua de lluvia, el viento, el oxígeno y los gases de combustión son los agentes que afectan a la durabilidad de los materiales pétreos. La parte que empieza a deteriorarse es la más superficial, por desgaste, desconchamiento, etc. Y con los años puede ir profundizando hacia la masa interna del material. En cuanto a las heladas, cuanto mayor sea la porosidad, más expuesto estará el material a saturarse de agua, y mayor presión se producirá en caso de congelación del agua que contenga.
- **Elasticidad.** En general, los materiales pétreos no son elásticos, aunque según sean granos o rocas, se pueden presentar ciertas deformaciones elásticas. Las piedras son muy poco elásticas, es decir, no se deforman, sino que directamente se rompen. Las muestras granulares sí pueden tener cierta deformación sobre todo en grandes agrupaciones.
- **Combustibilidad.** La resistencia al fuego es variable pero en general se puede considerar de tipo medio-bajo y menor si el material tiene cierta humedad. Por ello en caso de incendio el material aguantará cierto tiempo sin romper, y pasado ese tiempo se crearán tensiones elevadas en el material, sobre todo por la diferencia de temperatura entre la superficie y la masa interna.

1.2.3.2 Clasificación De Los Materiales Pétreos.

Se clasifican en función de la resistencia a compresión y según su origen o procedencia.

(Crespo Escobar, 2009)

➤ **Según la resistencia a compresión.**

- Clase A: resistencia muy alta: mayor de 2.250 kg/cm².
- Clase B: resistencia alta: de 1125 a 2.250 kg/ cm².
- Clase C: resistencia media: de 560 a 1125 kg/ cm².
- Clase D: resistencia baja: de 280 a 560 kg/ cm².
- Clase E: resistencia muy baja: de 70 a 280 kg/ cm².

➤ **Según su origen o procedencia.**

Pueden ser ígneas, sedimentarias y metamórficas.

- **Rocas ígneas.**

Son las más antiguas y se han formado por el enfriamiento y consolidación de magmas fundidos, y según qué se haya producido en el interior de la corteza terrestre o sobre ella, se llaman intrusivas o plutónicas (mucho profundidad), filoneas (poca profundidad) o extrusivas o volcánicas (superficiales).

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas recomienda clasificar las rocas en función de su composición y del tamaño de grano de los minerales que la forman. Entre ellas se deben destacar los granitos y basaltos cuya utilización en la construcción es muy grande

El carácter ácido de estas rocas lo confiere el contenido en SiO_2 del cuarzo y los silicatos. Cuando una roca contiene más de un 60% de SiO_2 tiene carácter ácido, y entre sus minerales además de los silicatos, debe de haber cuarzo, este es el caso de los granitos. Cuando el contenido en SiO_2 es menor del 60% no existe cuarzo, y las rocas tienen carácter básico, es el caso de los basaltos.

- **Rocas sedimentarias.**

Se han formado debido al transporte, acarreo, depósito y acumulación de materiales, principalmente provienen de rocas ígneas y metamórficas. Las rocas sedimentarias, de acuerdo con su procedencia, se pueden clasificar en detríticas, intermedias y no detríticas.

Dentro del grupo de las detríticas están incluidas todas aquellas rocas formadas por productos de alteración de otras, que han sido transportados y depositados pudiendo no estar todavía consolidados (rocas sueltas) o haber sufrido procesos de consolidación (rocas compactas).

Dentro del grupo de las no detríticas se encuentran aquellas formadas fundamentalmente por precipitación de sustancias que se encontraban en disolución en las cuencas de sedimentación, y que luego han sufrido los procesos de consolidación. También en ellas se incluyen, y en ocasiones constituyen la mayor parte, rocas formadas por conchas y caparazones de organismos vivos. En este caso se encuentran rocas calizas y algunas rocas silíceas.

Por último, existe un tercer grupo de rocas que están formadas por materiales con los dos orígenes, y que se denominan de rocas intermedias, en el que se encuentran las margas.

Detríticas	Sueltas	Compactas
	Gravas Arenas Limos Arcillas	Conglomerados Areniscas Limonitas Arcillitas
Intermedias		Margas
No detríticas	Carbonatadas	Calizas Dolomías
	Evaporitas	Yesos Cloruros
		Otras

Tabla 5. Clasificación de las rocas sedimentarias.

Fuente: Libro Materiales de Construcción para edificación y obra civil. Santiago Crespo Escobar. 2009.

La distinción o separación entre gravas, arenas, limos y arcillas es por el tamaño del grano:

- Gravas: ≥ 2 mm.
- Arenas: < 2 mm y $\geq 0,063$ mm.
- Limos: $< 0,063$ mm y $\geq 0,002$ mm.
- Arcillas: $< 0,002$ mm.

- **Rocas Metamórficas.**

Las rocas metamórficas se originan por metamorfismo fundamentalmente de las rocas sedimentarias. Recibe el nombre de metamorfismo el proceso por el que se producen ciertas modificaciones de la composición mineralógica y de la estructura de una roca a consecuencia principalmente de los incrementos de presión y temperatura que aquella experimenta cuando alcanza niveles profundos de la corteza terrestre.

Esto ocurre, por ejemplo, cuando se depositan espesores considerables de rocas sedimentarias por el proceso general de acumulación, que pueden alcanzar hasta 20 km de potencia. Una roca situada a estas profundidades queda sometida a considerables presiones y temperaturas que la “metamorfizan”.

La estructura de las rocas metamórficas puede manifestar todavía los planos de estratificación, pero presenta planos de esquistosidad o exfoliación, que se forman

perpendiculares a la dirección de la presión a que se ve sometida la roca, y al extraerlas en cantera, les da un carácter lajoso, que disminuye su calidad respecto a los materiales pétreos procedentes de las rocas sedimentarias o de las rocas ígneas.

1.2.4 Materiales que componen el Cordón Amurallado.

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

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



Pero la mayor parte de calizas proceden de la intervención de organismos que toman de las aguas los elementos para formar sus conchas y caparazones (corales, algas, foraminíferos, etc.). Al morir, se produce una acumulación de estas partes que se unen por un cemento calcáreo, generado a la vez que la sedimentación o por procesos diagenéticos. En el entorno cartagenero se encuentran en las colinas de Albornoz, incrustadas horizontalmente sobre arcillas y otras rocas que afloran en sus valles, situados a 8 Km de la ciudad sobre la carretera que va hacia el complejo industrial de Mamonal y cuyas reservas se estiman en 75 millones de toneladas. Otro yacimiento importante es el Turbaco, estimado en 1450 millones de toneladas, tomando como base su área de 58 Km². (Región Murcia digital., Accesado[27 de Febrero de 2015])



Ilustración 3. Hipótesis extracción de la piedra

Fuente: Augusto Martínez Segrega Q.E.P.D, Rosa Helena Martínez Vázquez, Rosemary Del Carmen Martelo Osorio, Alfonso Rafael Cabrera Cruz. *Arquitectos Restauradores*

Históricamente las mayores explotaciones de piedra caliza de Cartagena estuvieron ubicadas en las laderas de la popa en la denominada cantera de Tesca, otra importante explotación fue la cantera de Tierrabomba en el sitio del Tejar de San Bernabé de los Jesuitas contigua a la plataforma del Santangel, otra reserva explotada en esa época, era la hacienda Púa en Arroyo de Piedra, y otras de menor reserva, pero con características especiales en su composición química, ubicadas en todo el perímetro de la Bahía de Cartagena.

La mayoría de las canteras explotadas en los alrededores de la ciudad durante el período colonial tuvieron como elemento común su relativa cercanía a los cuerpos de agua, tales como bahías, caños, ciénagas, esteros y ensenadas.

Las canteras Nueva del Rey, la de los Jesuitas y la cantera del Cerro del Horno en Tierrabomba; las de Santa Rita, junto al caño de El cabrero; las canteras anexas a los Tejares de María en las faldas del cerro hoy ocupado por el colegio de la Salle; el Tejar de Escobar en el Pie del Cerro y el Valle de Escobar, cuyos materiales podían

ser transportados al recinto urbano en carretas y por el Caño de las Quintas, estuvieron todas muy próximas a dichos cuerpos de agua.

Pero lo que podríamos llamar el prototipo de las canteras en la época fue la cantera de Albornoz, cuyo testimonio documental es claro en los planos de la ciudad hasta hoy conocidos, además unos vestigios arqueológicos de una casa, contrario a los de Tierrabomba y de Barú, poco registrados gráficamente.

La parte central de esta cantera se encontraba en el camino que bordeaba la bahía hacia Esta cantera se mantuvo cerrada desde comienzos de la apoca republicana hasta principios del siglo XX en que nuevamente se continuo su explotación. Hoy, cuando ya su principal fuente caliza ha sido agotada, se utiliza para la extracción de zahorra. (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, Estudio De Las Propiedades Fisicas Y Mecanicas De Los Materiales Petreos Extraidos De La Isla De Tierrabomba. , 2014)

- **La Cal:** Es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio). Los tipos de cal más conocidos son:
 - Cal Viva: Se obtiene de la calcinación de la caliza que al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique 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.
- **Ladrillos 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. (Arcillas de Colombia, 2011)

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.

- **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. (Fernandez Torres & Palencia

Cantillo, Estudio De Las Propiedades Fisicas Y Mecanicas De Los Materiales Petreos Extraidos De La Isla De Tierrabomba. , 2014).

1.2.5 Consideraciones para la restauración de Patrimonios históricos

1.2.5.1 Principios teóricos.

Las restauraciones que se realizan en un monumento histórico deben cumplir con principios básicos. (Teran, 2004)

El **respeto a la evolución histórica** del inmueble se refiere a que se deben respetar las distintas etapas históricas constructivas del edificio, sus espacios originales así como las ampliaciones, remodelaciones de importancia, mismas que no impliquen una afectación que vaya en detrimento del bien inmueble.

- El principio de **No Falsificación** se aplica cuando en una intervención se requiera integrar (completar algún elemento arquitectónico o reproducir ciertas formas perdidas). Si por alguna razón la conservación del edificio requiere la sustitución o integración de una parte, forma o elemento arquitectónico determinado, así como el uso de materiales tradicionales similares a los que constituyen al inmueble, esta intervención debe ser reconocible, pero a la vez lograr una integración visual con el edificio, es decir, no debe resaltar o llamar la atención. Esto se ha logrado de diferentes maneras, como por ejemplo: fechando los nuevos elementos, usando materiales diferentes pero compatibles con los originales o utilizando los mismos, materiales pero dándoles un acabado o tratamiento distinto al original.
- El **respeto a la vejez o pátina**. En muchas ocasiones se ha confundido a la mugre con la pátina, pero ésta representa parte de la historia del bien arquitectónico al estar proporcionada por el envejecimiento natural de los materiales que constituyen a un monumento. Es decir, la pátina es una

protección natural del material, por lo que no lo deteriora. Cuando es mugre se debe quitar pues atenta la integridad de los materiales.

- El principio de **Conservación in situ** se refiere al hecho de no desvincular al edificio ni a sus elementos de su lugar de origen. Cuando por alguna causa, como por ejemplo, en el caso de un movimiento telúrico, algún elemento se ha desprendido de su lugar original, éste debe ser reintegrado en su sitio.
- Por último, el principio de **reversibilidad** se refiere a la selección de “aquellas técnicas, instrumentos y materiales que permitan la fácil anulación de sus efectos, para recuperar el estado del monumento previo a la intervención, si con una nueva aportación de datos, enfoques o criterios, ésta se juzga inútil, inadecuada o nociva al monumento.”

1.2.5.2 Grados de intervención.

En la disciplina de la Restauración existen cuatro grados de intervención: la Preservación, la Conservación, la Restauración y el Mantenimiento.

- **La preservación** constituye el conjunto de medidas cuyo objetivo es prevenir del deterioro a los inmuebles. Es una acción que antecede a las intervenciones de Conservación y/o Restauración, procurando que, con estas actividades, las alteraciones se retarden lo más posible, e implica el realizar operaciones continuas que buscan mantener al monumento en buenas condiciones.
- **La conservación** consiste en la aplicación de los procedimientos técnicos cuya finalidad es la de detener los mecanismos de alteración o impedir que surjan nuevos deterioros en un edificio histórico. Su objetivo es garantizar la permanencia de dicho patrimonio arquitectónico.
- **La restauración**, como grado de intervención, está constituida por todos aquellos procedimientos técnicos que buscan restablecer la unidad formal y la lectura del bien cultural en su totalidad, respetando su historicidad, sin falsearlo.

- **El mantenimiento** está constituido por acciones cuyo fin es evitar que un inmueble intervenido vuelva a deteriorarse, por lo que se realizan después de que se han concluido los trabajos de conservación o restauración (según sea el grado de intervención) efectuados en el monumento arquitectónico. (Teran, 2004)
- **Reestructuración:** Es la intervención que devuelve las condiciones de estabilidad pérdidas o deterioradas, garantizando, sin límite previsible, la vida de una estructura arquitectónica.
- **Reintegración:** Este término en la Restauración tiene diferentes acepciones, sin embargo, en la restauración arquitectónica es: la intervención que tiene por objeto devolver unidad a elementos arquitectónicos deteriorados, mutilados o desubicados.
- **Integración:** Esta intervención se ha definido como la aportación de elementos claramente nuevos y visibles para asegurar la conservación del monumento y consiste en completar o rehacer las partes faltantes de un bien cultural con materiales nuevos o similares a los originales, con el propósito de darle estabilidad y/o unidad visual a la obra, claro está que sin pretender engañar, por lo que se diferenciará de alguna forma del original.
- **Reconstrucción:** Es la intervención que tiene por objeto volver a construir partes desaparecidas o perdidas de un monumento. En la reintegración hablamos de elementos deteriorados o mutilados, en la reconstrucción, de partes perdidas. La reconstrucción supone la posibilidad el empleo de materiales nuevos y no la reutilización de elementos pertenecientes a la construcción original ya perdida. Esta intervención se refiere a las labores que se realizan en el monumento a nivel estructural; debe fundamentarse en el respeto al inmueble y será efectuada de tal manera que sea reconocible.

Al momento de realizar intervenciones en monumentos o cualquier tipo de estructuras se deben realizar unos estudios previos, y como en la mayoría de los casos estos inmuebles son de gran

extensión, no es viable realizar un análisis minucioso, por lo que se adoptan un modelo estadístico para así seleccionar un tramo de estudio. A continuación el modelo usado en este caso particular.

1.2.5.3 Tramo a estudiar:

Debido a la extensión del área de estudio, se aplicaron métodos estadísticos para conocer el número de ensayos necesarios con el fin de que la investigación sea confiable (Universidad Nacional de Colombia, 2006). El tamaño de muestra escogido debe tener un alto porcentaje de certidumbre. La fórmula para calcular el tamaño de muestra del tramo de muralla a evaluar es la siguiente:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{d^2 (N + 1) + Z^2 * p * q}$$

En donde,

N = tamaño de la población

Z = Valor de la campana de Gauss

p = Proporción esperada

q = probabilidad de fracaso

d = Error máximo admisible en términos de proporción

1.2.6 Tipos de Ensayos

1.2.6.1 Ensayos no Destructivos.

Debido a que es ilegal extraer núcleos o partes de los monumentos históricos como lo explica bien la ley colombiana, es necesario usar otro de tipo de ensayos diferentes a los convencionales, que no es más que realizar pruebas en “*in situ*” a los monumentos, en este caso las murallas de Cartagena de Indias con dispositivos tecnológicos como son: prueba de ultrasonido y ensayo de esclerómetro. A continuación se definen.

- **Ensayo con Esclerómetro.**

Ideado en un principio para estimar la resistencia a compresión simple del hormigón, se ha modificado convenientemente dando lugar a varios modelos, tipo L, N, P, etc., algunos de los cuales resulta apropiado para estimar la resistencia a compresión simple de la roca.



Ilustración 4. Esclerómetro (Martillo de Schmidt)

Fuente: (www.sociedadgeologica.es, 2004)

Su uso es muy frecuente ya que el dispositivo es bastante manejable, gracias a su peso y fácil transporte, pudiendo aplicarse sobre roca matriz y en las discontinuidades. El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie ensayada, para este caso la escarpa de las murallas. La medida obtenida es correlacionada mediante un gráfico realizado por Miller en 1965 que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al 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

- **Ensayo de Ultrasonido.**

El proceso de ensayo ultrasónico utiliza ondas de sonido de longitud de onda corta a altas frecuencias para identificar defectos y/o medir el espesor de los materiales, así como para detectar la corrosión. Si las oscilaciones mecánicas generadas por el sistema acústico son de alta frecuencia (mayores que 20kHz) el sistema se denomina ultrasónico (Fernandez Torres & Palencia Cantillo, Estudio De Las Propiedades Físicas Y Mecánicas De Los Materiales Pétreos Extraídos De La Isla De Tierrabomba. , 2014).

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 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.

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 producida por el cristal (ejemplo: vaselina o grasa consistente).

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.

1.2.6.2 Ensayos Destructivos

- **Determinación de la resistencia a la compresión en muretes de mampostería.**

En Colombia este ensayo está regido por la Norma Técnica Colombiana NTC-3495, que indica: La mampostería, bajo esfuerzos de compresión, presenta un comportamiento óptimo. Este comportamiento y sus fallas ante cargas axiales dependen de la interacción entre los ladrillos y el mortero. Cada material tiene características de esfuerzos-deformación diferentes, por lo tanto, cuando son

sometidos a un mismo esfuerzo sucede que el material menos deformable, restringe las deformaciones transversales del material más deformable.

Este método de ensayo comprende los procedimientos para la elaboración y ensayo de muretes de mampostería, y los procedimientos para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería, usada para determinar el cumplimiento del requisito de la resistencia nominal a la compresión de la mampostería especificada, $f'm$.

Al momento de realizar el ensayo de deben tener ciertas consideraciones como que: las caras de soporte de los bloques de transferencia de carga, de las placas de soporte y del espécimen, se deben limpiar con un trapo. El espécimen de ensayo se debe colocar sobre el bloque o placa de soporte inferior. Se debe alinear el eje del centroide del espécimen con el eje de aplicación de carga de la máquina. A medida que el bloque o placa superior, apoyada sobre una esfera, se va asentando sobre el espécimen, se debe rotar ligeramente la porción móvil del bloque superior, manualmente, con el fin de lograr que se asiente uniformemente. Cuando las áreas de soporte de los bloques de transferencia de carga, superior e inferior, no son suficientes para abarcar el área del espécimen, se debe colocar una placa de soporte suplementaria, de acero, entre los bloques de transferencia de carga de la máquina de ensayo y el espécimen refrentado, con un espesor de, al menos, la distancia desde el borde del bloque de transferencia de carga de la máquina a la esquina más distante del espécimen. La longitud y el ancho de las placas de metal endurecido deben ser, al menos, 6 mm mayores que la longitud y el espesor de los muretes. Con respecto a las cargas se deben aplicar, al murete, hasta la mitad de la carga esperada, a una velocidad adecuada. El resto de la carga se debe aplicar, a una rata uniforme, durante un período de no menos de 1 min y de no más de 2 min.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Establecer la conveniencia del uso de la piedra caliza y la argamasa en la restauración de la escarpa de las murallas en Cartagena de Indias, comparando los resultados obtenidos en el análisis físico y mecánico de muretes construidos con estos materiales, con los obtenidos en ensayos no destructivos hechos a la escarpa, con el fin de conservar el bien patrimonial en las mejores condiciones sin sacrificar su valor histórico.

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar el material con las mejores propiedades para la construcción de los muretes, a partir de la toma de muestras.

- Obtener las propiedades físicas y mecánicas de los muretes a escala construidos con material calizo y argamasa, de la cantera previamente seleccionada.

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la escarpa de las murallas de la ciudad de Cartagena de Indias.

- Comparar los resultados obtenidos en los muretes de laboratorio con los datos recolectados en la muralla en las pruebas de estimación no destructivas.

3. ALCANCE

El proyecto se centró en la búsqueda de materiales con propiedades y características similares a los usados originalmente en la construcción de las murallas de Cartagena de indias, para ser utilizados en la restauración de las mismas. Fue necesario practicarle ensayos de tipo físico al material recolectado en las canteras seleccionadas, pruebas que estuvieron enfocadas en la obtención de propiedades como: porosidad, peso específico, desgaste, humedad y absorción, esto fue necesario para tener claridad del aporte de las propiedades física de los materiales, en la construcción y ensayo de los muretes. Se necesitó realizar pruebas de tipo mecánico a una serie de muretes construidos a escala y con características constructivas similares a las de las murallas y así comparamos los resultados con los obtenidos en pruebas no destructivas realizadas a la escarpa de la muralla.

La investigación se llevó a cabo en: la universidad de Cartagena sede Piedra Bolívar, en sus laboratorios, en canteras aledañas a la ciudad de Cartagena: cantera coloncito, Bonanza, y la constancia, y en el tramo de evaluación de la escarpa el cual está comprendido entre el baluarte San Pedro Mártir y las bóvedas. (Ver ilustraciones: 5, 6,7)

El proyecto ejecutó en el segundo periodo académico del año 2015. En el desarrollo del mismo se visitaron solo las canteras mencionadas en el aparte anterior. Además es necesario mencionar que solo se realizaron ensayos no destructivos en las murallas para obtener información de su estructura.

Esta investigación se elaboró con el fin de obtener materiales, que al conformar muretes cumplan con los requisitos estructurales y arquitectónicos idóneos para la restauración, conservación y mantenimiento del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena, sin que se afecte el valor histórico, y poder así dar pie a futuras investigaciones, para que posteriormente se pueda restaurar de igual modo otros tramos de las murallas o diferentes monumentos de la ciudad, y sigan siendo un gran atractivo para los turistas que visitan Cartagena.

El proyecto estuvo enfocado en el análisis de resultados obtenidos en el estudio del comportamiento estructural de muretes para la restauración de la escarpa de las murallas, por lo que no se analizó la parte química que afecta a los materiales de estudio, de igual manera no se contempló el componente económico producto de la utilización de estos materiales en la restauración de la escarpa.

Cantera Coloncito



Ilustración 5. Ubicación colon planta de triturados

km 2 vía coloncito, turbado Colombia, Cartagena **Fuente:** (Google maps, 2015)

Cantera Bonanza

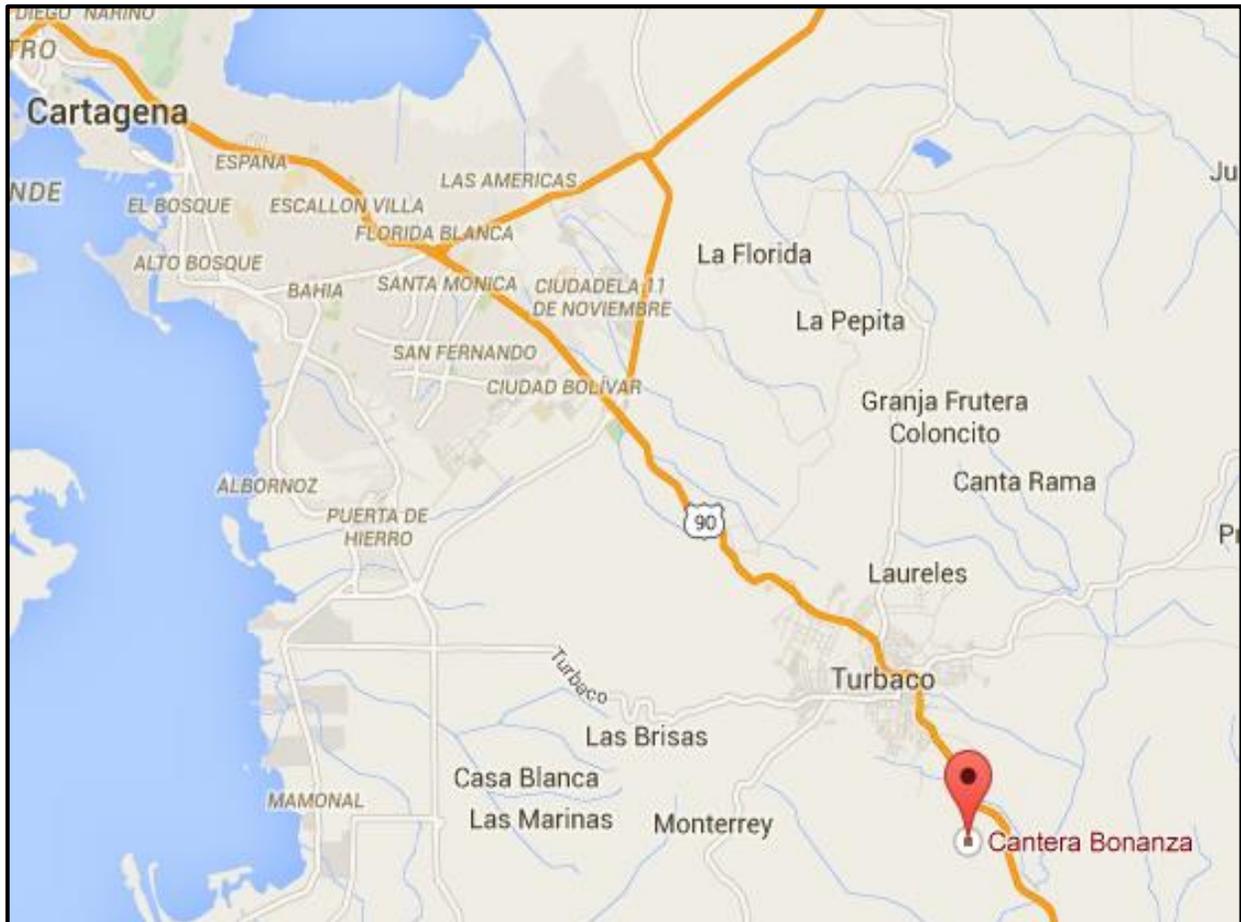


Ilustración 6. Cantera bonanza, dg31 100-175 I-101

Centro empresarial ternera Colombia, Cartagena **Fuente:** (Google maps, 2015)

Cantera la Constancia

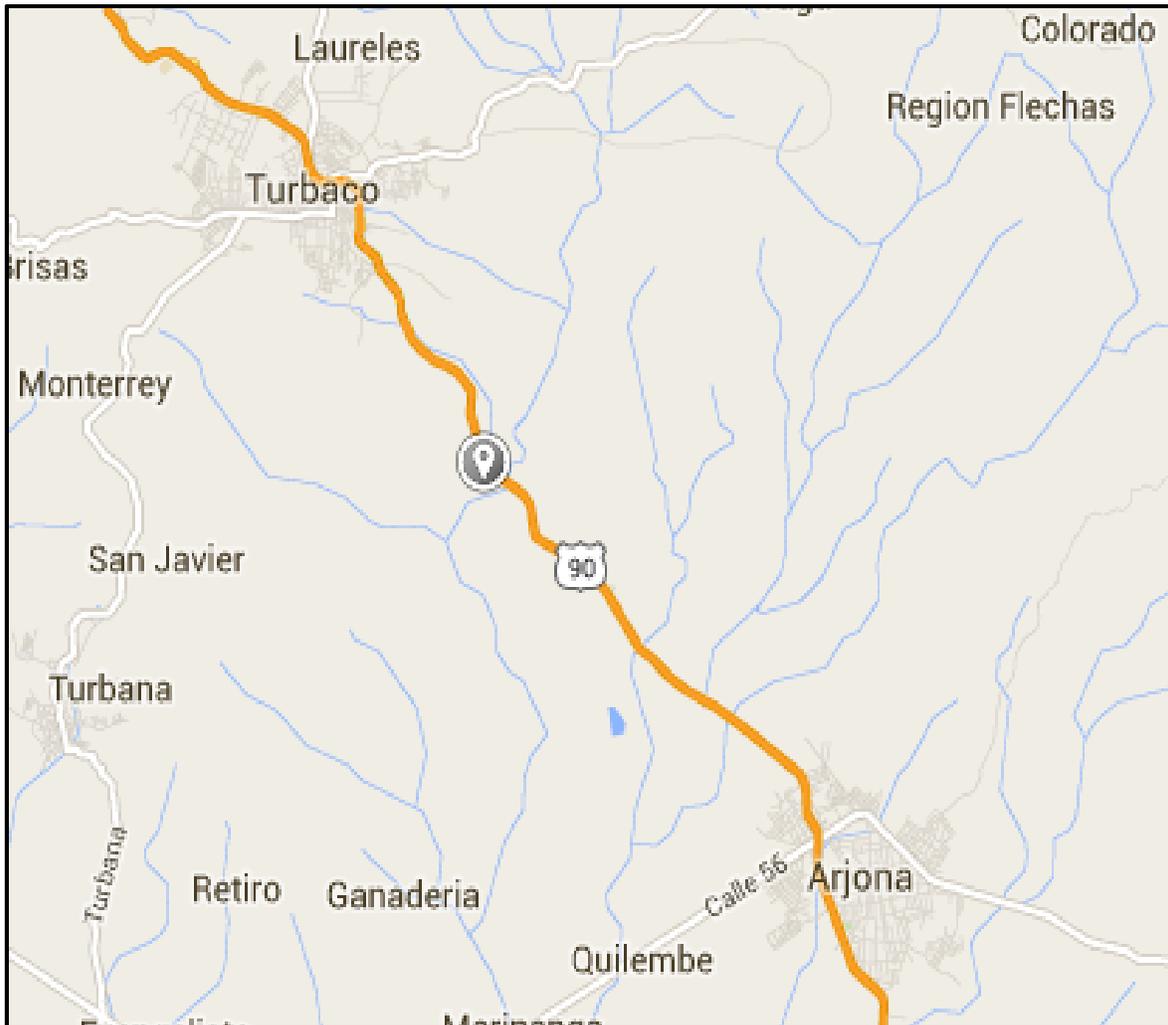


Ilustración 7. Cantera la Constancia

km 4 cantera constancia vía Arjona Bolívar, Colombia **Fuente:** (Google maps, 2015)

Universidad de Cartagena



Ilustración 8. Ubicación universidad de Cartagena

Avenida del Consulado # Calle 30 No. 48 – 152, Cartagena, Bolívar, Colombia

Fuente: (Google maps, 2015)

Zona de laboratorios Universidad de Cartagena

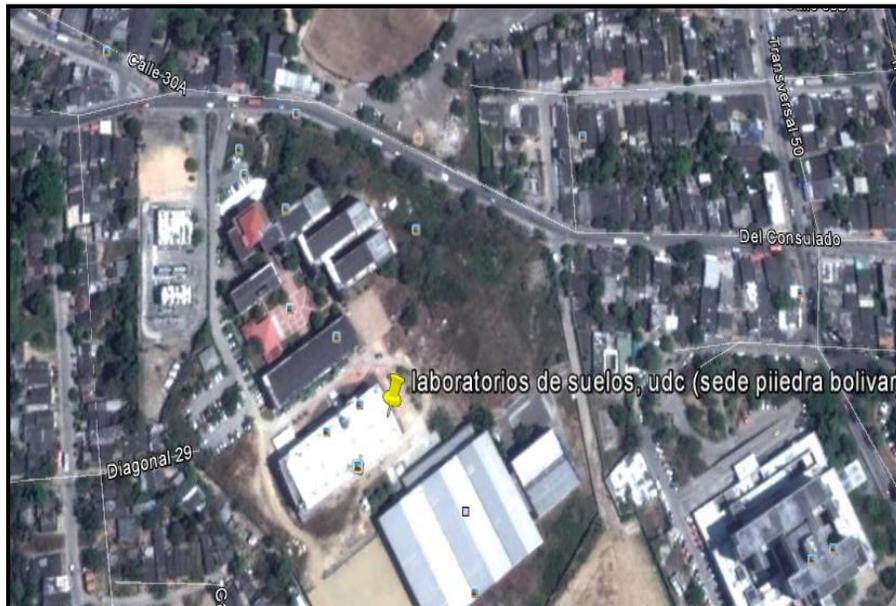


Ilustración 9. Ubicación Laboratorios universidad de Cartagena

Avenida del Consulado # Calle 30 No. 48 – 152, Cartagena, Bolívar, Colombia

Fuente: (Google earth, 2015)

Tramo a estudiar: baluarte San Pedro Mártir - bóvedas



Ilustración 10. Localización tramo

FUENTE: (<http://www.fortificacionesdecartagena.com>, 2015)

4. METODOLOGIA

4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN: MIXTA

La investigación mixta representa un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación que implican la recolección y el análisis de datos cualitativos y cuantitativos, para realizar inferencias producto de toda la información recolectada y poder así lograr una mayor comprensión del fenómeno bajo el cual se está realizando el estudio. (Crúz Guzman, 2011)

El motivo por el cual este proyecto manejó un enfoque mixto es debido a que se llevó a cabo una previa documentación bibliográfica del tema, unos estudios experimentales y se efectuaron ensayos de tipo físico-mecánico en los diferentes tipos de material calizo encontrados en las canteras aledañas a la ciudad de Cartagena, y de igual forma se ensayó la argamasa con las relaciones calculadas, luego de tener todos estos resultados finalmente se construyeron y ensayaron los muretes.

4.2 TECNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

4.2.1 Información primaria

- ✓ **Recolección de los materiales:** Para la obtención de materiales se procedió a identificar las canteras que suministran de material calizo a la ciudad de Cartagena de indias, para ello se realizaron visitas a cada una de las canteras, las cuales están ubicadas en las cercanías de la ciudad y en la vía que comunica del municipio de Turbaco, Bolívar hasta el municipio de Arjona. Una vez identificadas las canteras (Coloncito, Bonanza, La Constancia), se hicieron viajes a cada una de ellas y se procedió a la obtención del material. Ya adquirido el material, se definió el mortero de pega (argamasa) el cual está constituido por cal y agregado fino (consiste en arena natural lavada).

A continuación se muestran las fotografías de los diferentes tipos de materiales extraídos en las canteras estudiadas, (ilustración 1, ilustración 2 e ilustración 3):



Ilustración 11. Material extraído en la Constancia. **FUENTE:** (Los Autores, 2015)



Ilustración 12. Material extraído en Coloncito. FUENTE: (Los Autores, 2015)



Ilustración 13. Material extraído en Bonanza. FUENTE: (Los Autores, 2015)

Posteriormente se efectuó la construcción de los muretes de caliza y argamasa para su posterior estudio.

- ✓ **Ensayos de laboratorio a muestras de material para determinar propiedades físicas:** Se realizaron ensayos físicos a las diferentes muestras de materiales traídos de cada una de las canteras seleccionadas (Coloncito, Bonanza y la Constancia), según lo planteado en las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y (I.N.V), desarrolladas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas Colombianas (ICONTEC). Los ensayos se realizaron a las muestras de cada fuente de material son los siguientes:
- ✓ **Ensayo de Peso específico (INV E-223-07):** Se secó la muestra en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas para muestras de tamaño máximo nominal de 37.5 mm (1 ½”); Posteriormente se sumergió en agua, también a temperatura ambiente, durante un período de 15 a 19 horas. Como se observa a Continuación:



Ilustración 14. Toma de Datos para Peso Específico. FUENTE: (Los Autores, 2015)

Inmediatamente después se procedió a tomar el peso de las muestras sumergidas, como lo indica la norma (INV E-223-07), tal cual como se puede observar en la ilustración 5.



Ilustración 15. Pesaje de Muestra Sumergida. FUENTE: (Los Autores, 2015)

- ✓ **Ensayo de Resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles (INV E-219-07):** Se llevó a cabo el ensayo al desgaste bajo las normas (INV E-219-07) y (INV E-218-07) puesto que la gradación de nuestros materiales nos llevaron a escoger gradación tipo “B” y tipo “E” como se describe en la tabla dada a continuación:

PASA TAMIZ No.	RETENIDO SOBRE TAMIZ No.	500 REVOLUCIONES				1000 REVOLUCIONES		
		A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2 "					2500		
2 "	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1 "	1250					5000	5000
1 "	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
No. DE ESFERAS :		12	11	8	6	12	12	12

Tabla 6. Gradaciones INV-E 219-07 y INV-E 218-07. FUENTE: (INVIAS, 2007)

A continuación se tomaron las cantidades de materiales según la tabla anterior y se ingresó posteriormente el material a la máquina de los ángeles el tiempo y las revoluciones que describe la actual norma.



Ilustración 16. Ensayo Desgaste Máquina de los ángeles. FUENTE: (Los Autores, 2015)

- ✓ **Ensayo de Porosidad (INV E-223-07):** Se sumergió la muestra durante 24 horas y después del período de inmersión, se sacó la muestra del agua y se secaron las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se eliminó el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomaron las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación del agua de los poros durante la operación de secado de la superficie de las partículas. (INVIAS, 2007)



Ilustración 17. Muestras Sumergidas para cálculo de Porosidad. FUENTE: (Los Autores, 2015)

Finalmente se llevó la muestra al horno durante 24 horas a 110°C para poder así determinar el porcentaje de absorción de cada una de las muestras referentes a cada Cantera.

- ✓ **Ensayo de Humedad (INV E-122-07):** El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca. En este se realizó la misma relación con cada una de las muestras de las canteras.



Ilustración 18. Muestra seca para ensayo de humedad natural. FUENTE:(Los Autores 2015)

Con el fin de obtener datos más cercanos a la realidad y siguiendo las recomendaciones de las Normas usadas se llevaron a cabo 3 pruebas por cada uno de los ensayos descritos previamente, es decir 12 ensayos por cada cantera, para un total de 36 ensayos de laboratorio en este ítem.

- ✓ **Ensayos de laboratorio a morteros de mampostería:** se realizaron ensayos de consistencia normal y tiempo de fraguado a morteros de cal hidráulica, basándonos en

las normas invias: (I.N.V. E – 305 – 07) para tiempo de fraguado y (I.N.V. E – 305 – 07) para consistencia normal.



Ilustración 19. Calculo ensayo a mortero de cal hidráulica. FUENTE:(Los Autores, 2015)

- ✓ **Construcción de muretes:** Se construyeron 9 muretes teniendo en cuenta las medidas de diseño mostradas en la siguiente ilustración, y estas dimensiones se dieron con el fin de cumplir las relaciones (Altura / Espesor) establecidas en la NTC-3495.

a_m/e_m^A	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Factor de corrección	0,75	0,86	1,00	1,04	1,07	1,15	1,22

Tabla 7. Relación Altura/Espesor. FUENTE:(NTC-3495), 2010

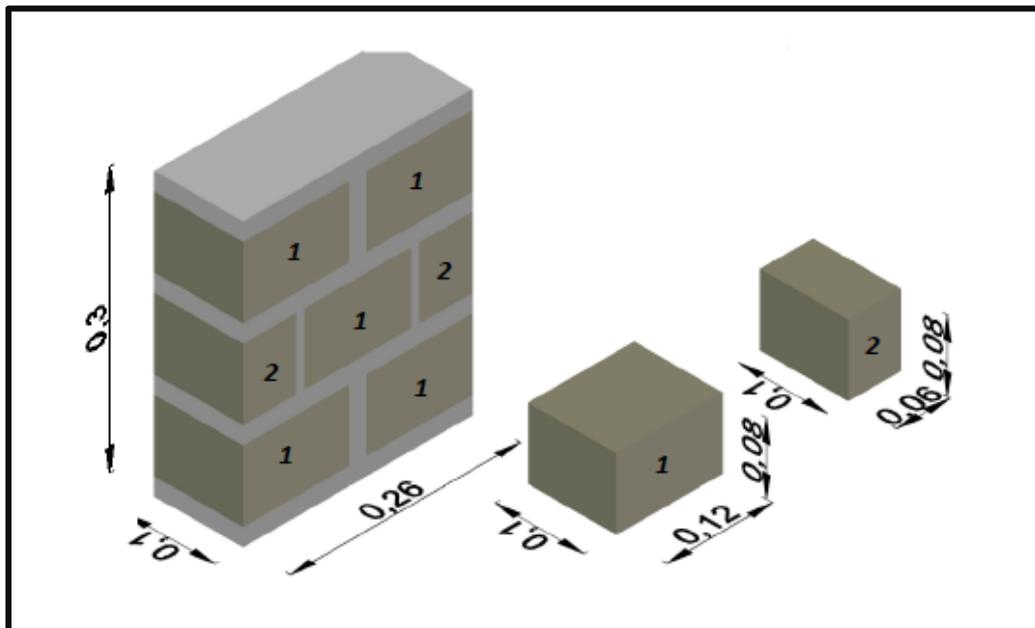


Ilustración 20. Esquema construcción de Muretes. FUENTE: (Los Autores, 2015)



Ilustración 21. Muretes Construidos para ser ensayados. FUENTE: (los Autores, 2015)

- ✓ ***Ensayos de laboratorio a muretes:*** se llevaron a cabo 9 ensayos de resistencia a la compresión, 3 por cada una de las canteras usadas en la investigación, tal cual como lo plantea la NSR 10 en el título D.3.7 y siguiendo los lineamientos de ensayo de la NTC 3495. Fueron realizados en los laboratorios de la empresa “Antonio Cogollo Ingeniería S.A.S”



Ilustración 22. Ensayo a Compresión de Muretes. FUENTE: (Autores, 2015)

- ✓ ***Ensayos no destructivos a las murallas:*** Se usó la llamada técnica “in situ” de ensayos no destructivos, exactamente los ensayos de cálculo para la resistencia a la compresión en un muro de mampostería, haciendo uso de los equipos de: Esclerómetro y Ultrasonido.

Este tipo de ensayo se realizó para evitar entrar en la ilegalidad, ya que por Ley de la Republica de Colombia, no se puede extraer material del monumento para llevar a cabo ensayos destructivos.



Ilustración 23. Tramo de Muralla Ensayada. FUENTE: (Los Autores, 2015)

- ✓ **Prueba de Esclerómetro (Martillo de Rebote):** Se ensayaron 9 puntos en la escarpa de las murallas del tramo seleccionado (Baluarte San Pedro Mártir – Las Bóvedas) con el fin de disponer de una estimación fiable del índice de rebote de la zona de ensayo. Siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C805, se construyó una cuadrícula de líneas separadas de 25 mm a 50 mm, usando los puntos de intersección entre líneas como zona de impacto del martillo.



Ilustración 24. Ensayo de Martillo de Rebote en el Tramo. FUENTE: (Los Autores, 2015)

- ✓ **Prueba de Ultrasonido:** Se realizaron 2 pruebas de ultrasonido en partes diferentes del tramo de muralla estudiado (Baluarte San Pedro Mártir – Las Bóvedas), teniendo así un dato más certero del comportamiento de la escarpa como muro de mampostería.

4.2.2 Información secundaria

- **Recolección de información bibliográfica:** Se llevó a cabo la búsqueda de la información necesaria sobre el tema de estudio, como: la historia, teoría, antecedentes, proyectos investigativos, aplicación y utilización, estando apoyado en los antecedentes, y estudios en los que ha tenido que ver la universidad de Cartagena y otras instituciones tanto nacionales como internacionales en cuanto al tema a tratar.

4.3 TECNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

- ***Análisis mediante cuadro comparativo:*** Con base en los resultados obtenidos en los ensayos a los muretes se procedió a tabular, realizando una comparación de los resultados de resistencia de cada muestra, describiendo la relación entre las resistencias arrojadas de cada murete construido con material calizo y las pruebas no destructivas realizadas a la escarpa de la muralla en el tramo a estudiar.
- ***Análisis de las curvas Esfuerzos vs Rotura:*** Con los resultados arrojados por la Máquina de marco de prueba a compresión, se pudo determinar cuál cantera está mejor adaptada a las condiciones originales de las murallas de Cartagena de indias, Posteriormente se hizo un cuadro comparativo entre las resistencias obtenidas en el material de cada cantera.

5. RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS

Siguiendo los lineamientos planteados en la metodología, y teniendo todos los materiales a la mano, así como también la disposición de los laboratorios junto con los equipos pertinentes para poder llevar a cabo la realización de los ensayos explicados previamente en la metodología, obteniendo finalmente los resultados juntos con su respectivo análisis, que se expresan a continuación:

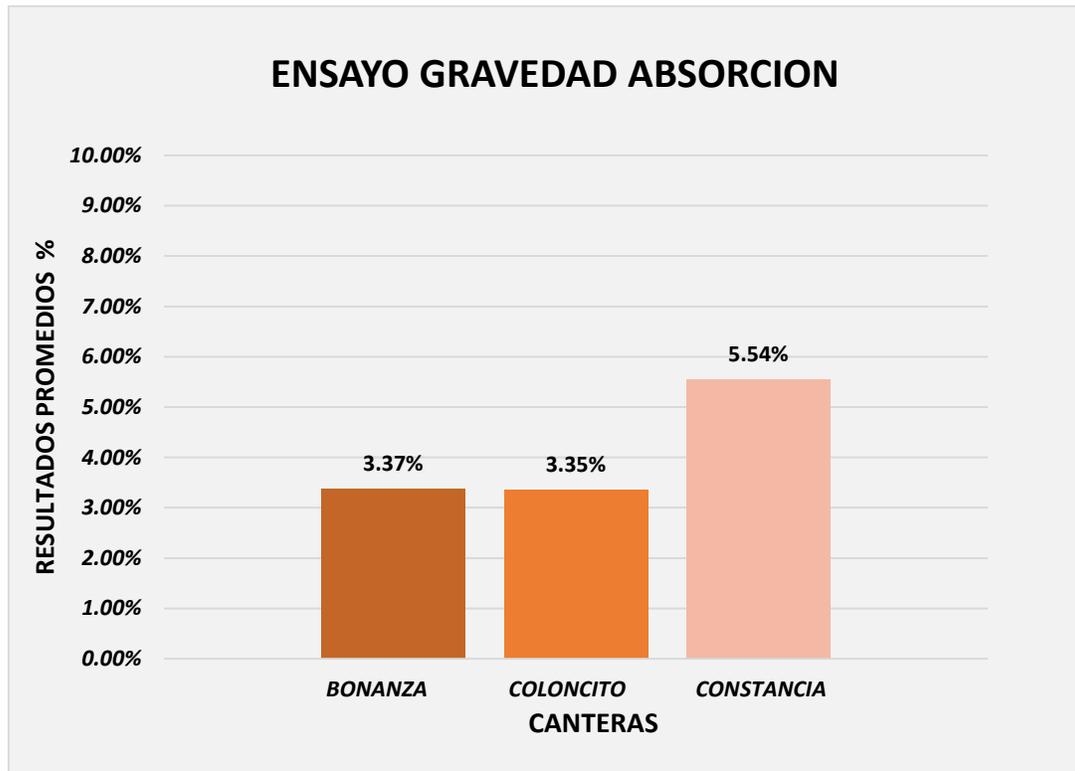
5.1 RESULTADO Y ANALISIS DE ENSAYO DE ABSORCION Y GRAVEDAD ESPECÍFICA.

		UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL									
Autores:		ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.						Fecha:		AGOSTO.2015	
Descripción del Material:		CALIZA CORALINA									
ENSAYO DE ABSORCION Y GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (I.N.V. E-223-07)											
CANTERA			BONANZA			COLONCITO			CONSTANCIA		
MUESTRA #			1	2	3	1	2	3	1	2	3
(B) PESO MUESTRA S.S.S (gr)			2583.43	2579.3	2580.8	2568.88	2564.9	2570	2573	2570	2575
(C) PESO MUESTRA SUMERGIDA (gr)			1569.42	1570.2	1560.8	1542.1	1540	1538	1421.88	1420	1418
(A) PESO MUESTRA SECA (gr)			2504	2500.5	2501	2486	2483	2485.3	2438.1	2435	2440
ABSORCION %			3.17	3.15	3.19	3.33	3.30	3.41	5.53	5.54	5.53
PROMEDIO DE ABSORCION %			3.17			3.35			5.54		
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK S.S.S			2.55	2.56	2.53	2.50	2.50	2.49	2.24	2.23	2.23
PROMEDIO GRA. ESP. BULK S.S.S			2.54			2.50			2.23		

Tabla 8. Resultado Ensayos de Porosidad y Peso Específico. FUENTE: (Los Autores, 2015)

En la tabla anterior se pueden observar los resultados obtenidos en los ensayos de porosidad (absorción) y peso específico (Gravedad específica). Estas pruebas fueron realizadas en los laboratorios de la Universidad de Cartagena.

Como hemos aprendido a lo largo de nuestra estancia en la universidad, se sabe que la absorción está ligada directamente con el espacio entre poros (porosidad), y esta propiedad de los materiales a su vez es un factor que influye en la densidad de una muestra de material.



Grafica 1. Comparación Ensayos Absorción. FUENTE: (Autores, 2015)

Como se observa en la gráfica anterior, las muestras de cada cantera las podemos separar en dos grupos, un grupo formado por las cantera Bonanza y Coloncito que tienen resultados muy similares y el otro grupo formado en solitario por la cantera Constancia. De estos resultados se infiere fácilmente que la cantera coloncito y constancia tienen un material que se comporta igual en esta propiedad con resultados de 3,37% y 3,35% respectivamente, mientras que el material extraído de Constancia posee casi el doble de poros con capacidad absorbente, esta característica se sabe que influye directamente en otras propiedades que serán analizadas a continuación en esta investigación.

5.2 RESULTADO Y ANALISIS ENSAYO DE DESGASTE.

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL		 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA								
Autores:		ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.		Fecha:		AGOSTO.2015				
Descripción del Material:		CALIZA CORALINA		ENSAYO DE DESGASTE EN LA MAQUINA DE "LOS ANGELES" (I.N.V. E - 218- 07)						
		CANTERAS								
		<i>BONANZA</i>			<i>COLONCITO</i>			<i>CONSTANCIA</i>		
<i>ENSAYO N°</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>GRADACION</i>		"B"	"B"	"B"	"E"	"E"	"E"	"B"	"B"	"B"
<i>PESO INICIAL</i>		5000	5000	5000	10000	10000	10000	5000	5000	5000
<i>PESO FINAL</i>		3649.3	3645.2	3652.8	6682.3	6680.6	6685.1	3075	3074.8	3075.4
<i>% DE DESGASTE</i>		27.01	27.10	26.94	33.18	33.19	33.15	38.50	38.50	38.49
PROMEDIO % DESGASTE		27.018			33.17			38.50		

Tabla 9. Resultado Ensayo de Desgaste. FUENTE: (Los Autores, 2015)

Se puede observar en la Tabla anterior Los resultados arrojados del desgaste mediante el uso de la máquina de los ángeles. Estos resultados se muestran para cada una de las canteras en la misma tabla con el fin de facilitar el posterior análisis.

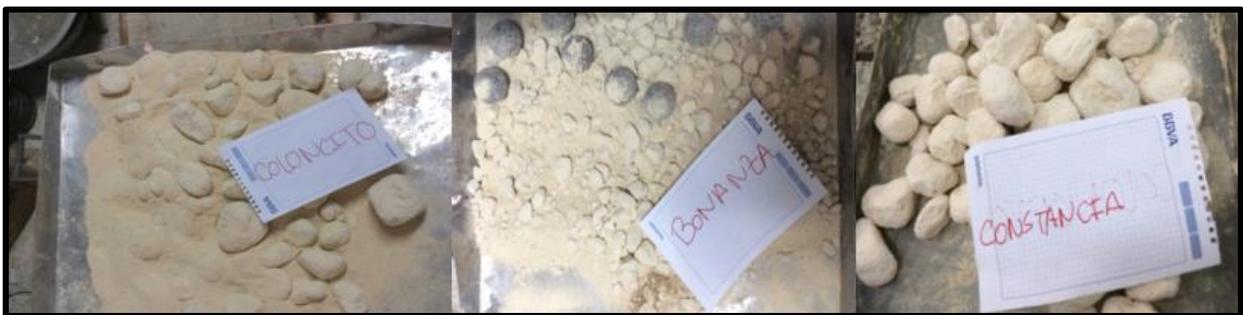
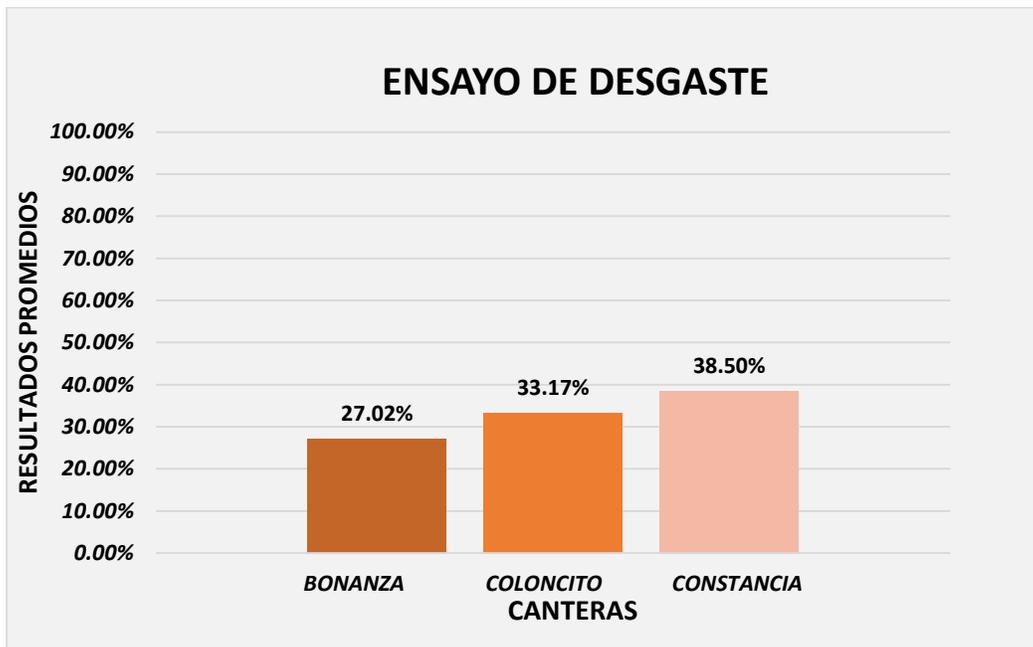


Ilustración 25. Estado de las muestras después de la prueba de Desgaste. FUENTE: (Los Autores, 2015)

En la ilustración de arriba se puede ver como quedaron las muestras después del paso por la máquina de los ángeles.



Gráfica 2. Resultado Comparativo Ensayo Desgaste. FUENTE: (Los Autores, 2015)

Teniendo en cuenta los datos obtenidos del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles se puede deducir que estos resultados no están tan dispersos, pues varían desde 27,02% hasta 38,50%, teniendo la Cantera Bonanza el dato más alto y Constancia el más bajo. Lo que quieren decir estos resultados es que en cuanto a la resistencia al desgaste y la abrasión el material que había tenido mayor absorción de agua es el mismo que tuvo mayor desgaste 38,50% de pérdida de material en la muestra de la cantera Constancia, mientras que las otras 2 muestras tuvieron un comportamiento similar 27,02% y 33,17% en las canteras Bonanza y Coloncito respectivamente, por tanto si solo se evaluara esta propiedad para determinar cuál material es mejor para la restauración de las murallas en el tramo descrito con anterioridad habría de descartarse la cantera Constancia para futuras intervenciones en el inmueble histórico.

5.3 RESULTADO Y ANALISIS ENSAYO DE HUMEDAD

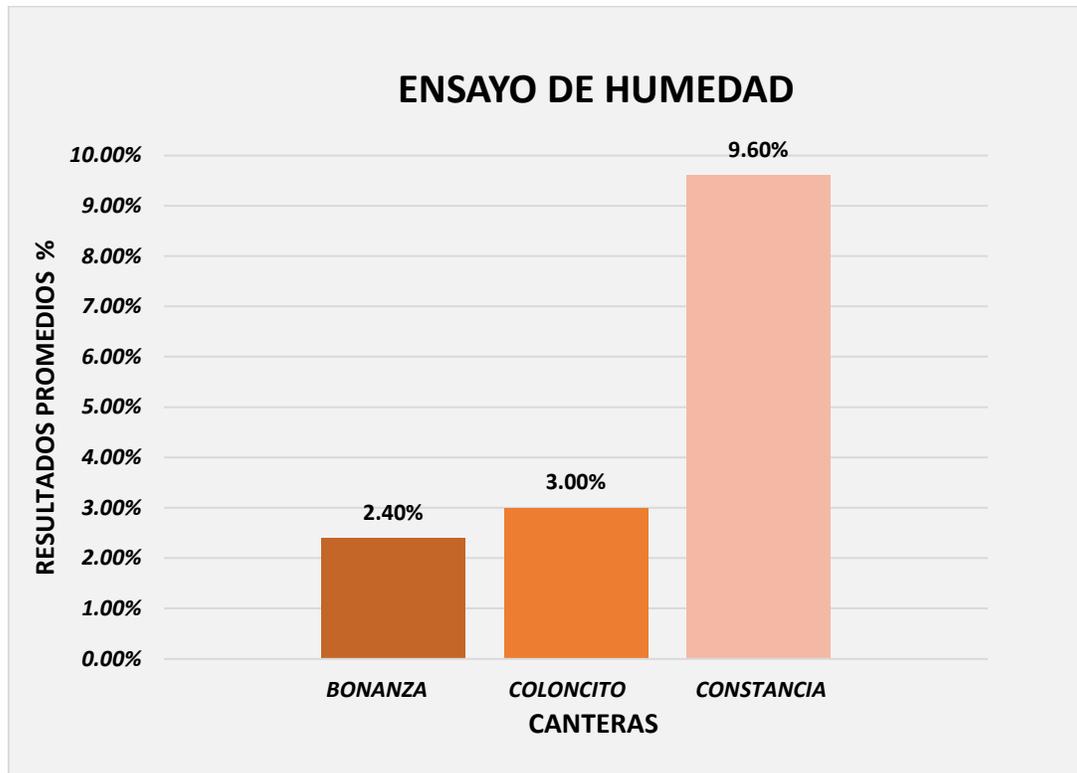
 <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL</p> </div> 												
Autores:				ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.			Fecha: AGOSTO.2015					
Descripcion del Material				CALIZA CORALINA								
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL (I.N.V. E - 122- 07)												
	CANTERA			BONANZA			COLONCITO			CONSTANCIA		
No. Ensayo	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso Suelo Húmedo + Recipiente (gr.)	1,261.2	1,262.5	1,264.2	689.6	690.3	683.8	726.6	728.8	725.2			
Peso Suelo Seco + Recipiente (gr.)	1,250.5	1,253.8	1,248.0	673.2	671.8	674.2	679.9	677.3	682.4			
Peso recipiente (gr.)	761.0	762.3	760.4	173.9	175.3	171.3	190.1	192.3	190.4			
Peso Suelo Seco (gr.)	489.5	491.5	487.6	499.3	496.5	502.9	489.8	485.0	492.0			
Peso Agua (gr.)	10.7	8.7	16.2	16.3	18.5	9.6	46.7	51.5	42.8			
Contenido de Humedad (%)	2.2	1.8	3.3	3.3	3.7	1.9	9.5	10.6	8.7			
Promedio de Humedades (%)	2.4			3.0			9.6					

Tabla 10. Resultados ensayo de Humedad. **FUENTE:** (Los Autores, 2015)

En los ensayos de humedad se procedió de igual manera que con los ensayos anteriores, se hicieron 3 ensayos por cada cantera y los resultados se promediaron para tener un dato más cercano a la realidad, estos resultados se muestran en la **tabla anterior** Y de igual forma se tabulan en una misma tabla los datos arrojados por los materiales de cada fuente de material, facilitando así su posterior entendimiento.



Ilustración 26. Equipo usado para el secado de las muestras durante el ensayo a humedad. **FUENTE:** (Los Autores, 2015)



Grafica 3. Comparación Resultados Ensayo Humedad. FUENTE: (Autores, 2015)

Como era de esperarse en este ensayo, un dato conlleva a otro. En los análisis previos se observó que la cantera Constancia nos dio un mayor porcentaje de absorción, es decir tiene mayor separación entre poro y poro, lo que a su vez le permite al material de esta cantera retener mayor cantidad de humedad con respecto a las otras dos canteras analizadas.

La muestra extraída de la cantera la Constancia es un material que tiene 300% más humedad natural que el de las otras dos fuentes de suministros, esta característica tan elevada de material pétreo en comparación con otro de propiedades similares, lo hace más frágil en ciertas situaciones o usos, permitiendo así descartarlo, o buscar uno con menor humedad.

En este caso particular es conveniente mejor usar materiales de Bonanza o Coloncito, en cuanto a esta propiedad específica se refiere.

5.4 RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS A MORTEROS DE ARGAMASA.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados al mortero representativo que será usado como pega posteriormente en los muretes. Los ensayos que se realizaron a la argamasa fueron, de Tiempo de Fraguado (**Tabla. 11**) y el ensayo de consistencia normal (**Tabla 12**).

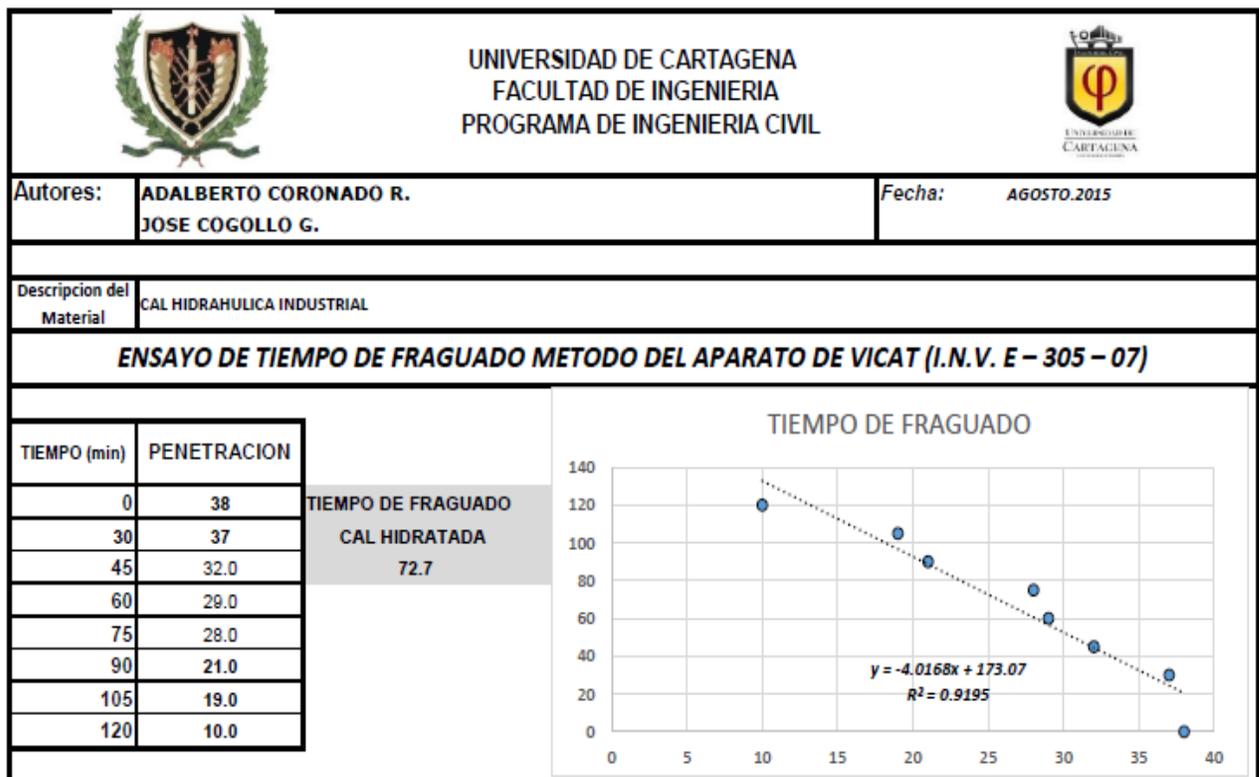


Tabla 11. Resultado del ensayo de Tiempo de Fraguado. **FUENTE:** (Los Autores, 2015)

El ensayo de tiempo de fraguado de la cal por el método del aparato de Vicat es el más usado para el cálculo de esta propiedad de los materiales cementantes, en la **Tabla 11**. Se puede observar el tiempo y la penetración para cada tiempo, obteniendo así los datos para generar la curva de Tiempo de Fraguado que describe mejor el comportamiento de la Cal Hidráulica Industrial usada para estos ensayos.

5.5 RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYO DE MARTILLO DE REBOTE EN EL TRAMO.

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL		
Autores:	ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.	Fecha: OCTUBRE 2015
Descripción del Material:	CALIZA CORALINA	
ENSAYO DE COMPRESION NO DESTRUCTIVO "ESCLEROMETRO"		
PUNTO 1 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
31	24.5	140 Kg/cm ²
17		
25		
22		
24		
23		
30		
23		
20		
30		
30		
PUNTO 2 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
27	27.2	180 Kg/cm ²
32		
29		
27		
20		
22		
25		
25		
30		
35		
35		
PUNTO 3 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
19	24.7	140 Kg/cm ²
22		
20		
27		
24		
23		
21		
40		
26		
25		
25		
DESCRIPCION DE PUNTOS: PUNTO 1 ALLADO A LA ENTRADA A SANDEGO PUNTO 2 PUERTA DE SANTA CATALINA PUNTO 3 BAJO LA GARITA		
		HOJA 1

Tabla 13. Resultado Prueba Martillo de Rebote punto (1, 2,3). FUENTE: (Autores, 2015)

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL		
Autores:	ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.	Fecha: OCTUBRE 2015
Descripción del Material:	CALIZA CORALINA	
ENSAYO DE COMPRESION NO DESTRUCTIVO "ESCLEROMETRO"		
PUNTO 4 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
26	26.5	165Kg/cm ²
28		
28		
30		
31		
25		
34		
20		
26		
27		
27		
PUNTO 5 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
20	23.9	130 Kg/cm ²
25		
25		
22		
22		
30		
20		
23		
26		
26		
26		
PUNTO 6 ($\alpha=0^\circ$)		
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
20	28	180 Kg/cm ²
36		
25		
22		
28		
33		
30		
36		
26		
24		
24		
DESCRIPCION DE PUNTOS: PUNTO 4 ESQUINA FRENTE CASA RAFAEL NUÑEZ PUNTO 5 DIAGONAL A MEGA TIENDA; ENTRE ESQUINA Y ESQUINA PUNTO 6 ESQUINA DE A.V. SANTADER, ENTRADA TUNEL BOBEDA S		
		HOJA 2

Tabla 14. Resultado Prueba Martillo de Rebote punto (4, 5, 6). FUENTE: (Autores, 2015)

		UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL			
Autores:	ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.			Fecha:	OCTUBRE 2015
Descripción del Material:	CALIZA CORALINA				
ENSAYO DE COMPRESION NO DESTRUCTIVO "ESCLEROMETRO"					
PUNTO 7 ($\alpha=0^\circ$)		PUNTO 8 ($\alpha=0^\circ$)		PUNTO 9 ($\alpha=0^\circ$)	
LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²	LECTURA DE ESCLEROMETRO (R)	PROMEDIO	LECTURA EN Kg/cm ²
28	23.4	130 Kg/cm ²	35	33.8	260 Kg/cm ²
20					
22					
20					
20					
30					
22					
24					
25					
23					
35	25.9	158 Kg/cm ²	30	25.9	158 Kg/cm ²
35					
25					
40					
25					
28					
45					
38					
37					
25					
22					
DESCRIPCION DE PUNTOS:					
PUNTO 7 FRENTE A CANCHA LAS TENAZAS					
PUNTO 8 GARITA A.V. SANTANDER					
PUNTO 9 BOQUETILLO					
					HOJA 3

Tabla 15. Resultado Ensayo Martillo de Rebote Puntos (7, 8, 9) FUENTE: (Autores, 2015)

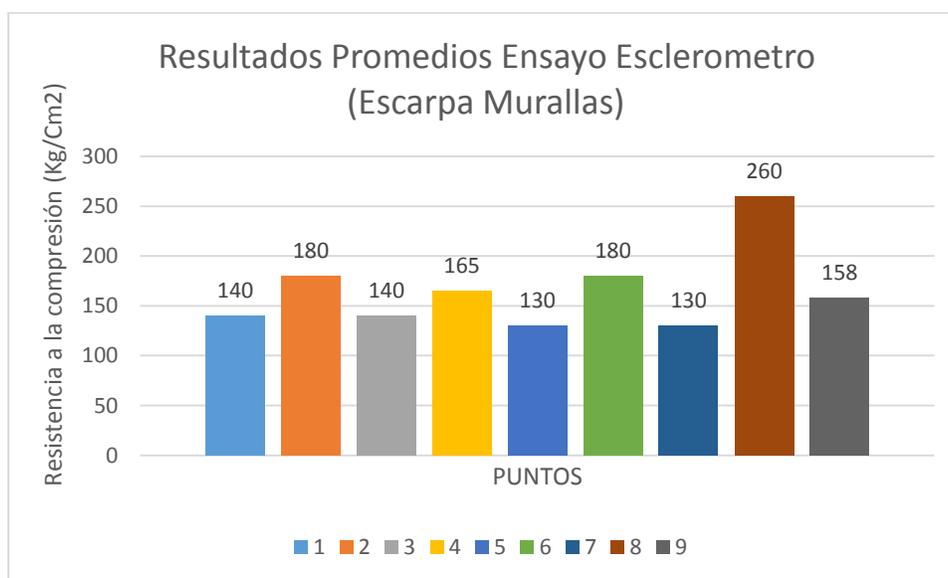
En las **Tablas 13, 14 y 15** se pueden apreciar los datos obtenidos para cada punto, mediante el ensayo de martillo de rebote sobre la escarpa de las murallas de Cartagena de indias, en el tramo comprendido entre el Baluarte San Pedro Mártir y las Bóvedas se apreció que todas las zonas de impactos poseen un valor muy similar. Y estos valores serán comparados con otros ensayos en los que se mide la misma propiedad.

A continuación en la **Tabla 16** se puede observar un resumen de los datos anteriores.

RESUMEN DE DATOS		
PUNTOS	LECTURA EN Kg/cm ²	PROMEDIO Kg/cm ²
1	140	164,78 Kg/cm ²
2	180	
3	140	
4	165	
5	130	
6	180	
7	130	
8	260	
9	158	

Tabla 16. Resumen de datos obtenidos en los 9 puntos. FUENTE:(Autores, 2015)

Como se puede observar en la tabla resumen anterior, donde se muestran los resultados promedios de todos los datos de rebote en cada punto, teniendo en cuenta esa información se diagraman estos resultados en el grafico siguiente para tener así una imagen de que tan disperso están estos resultados.



Grafica 4. Comparación Resistencia a la Compresión mediante Esclerómetro (Escarpa). FUENTE: (Autores, 2015)

En la escarpa de las murallas, en el tramo en cuestión se tienen resultados que varían de 140 Kg/Cm² a 260 Kg/Cm² estos datos así de separados el uno del otro se deben a las condiciones en que se encontraban algunas piedras en ciertos puntos del estudio hecho, en algunos casos se desprendía material al momento de accionar el martillo, dando así resultados que a simple

vista son erróneos, pero en general todo el tramo tiene una resistencia promedio 164, 78 Kg/Cm².

5.6 RESULTADOS Y ANALISIS ENSAYOS A COMPRESIÓN EN MURETES (MARCO DE PRUEBA).

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL		 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA		
Autores:	ADALBERTO CORONADO R. JOSE COGOLLO G.	Fecha:	OCTUBRE.2015	
Descripción del Material:	CALIZA CORALINA			
ENSAYO DESTRUCTIVO A LA COMPRESION "MARCO DE PRUEBA"				
ENSAYO A MURETES				
CANtera	MURETE N°	RESULTADO EN KN	PROMEDIO POR CANtera EN KN	PROMEDIO POR CANtera EN Kg/cm ²
COLONCITO	1	60.2	70,83 KN	27,77 Kg/cm ²
COLONCITO	2	68.6		
COLONCITO	3	83.7		
BONANZA	1	73.3	71,87 KN	28,2 Kg/cm ²
BONANZA	2	65.7		
BONANZA	3	76.6		
CONSTANCIA	1	64.8	68,57 KN	26,9 Kg/cm ²
CONSTANCIA	2	63.5		
CONSTANCIA	3	77.4		

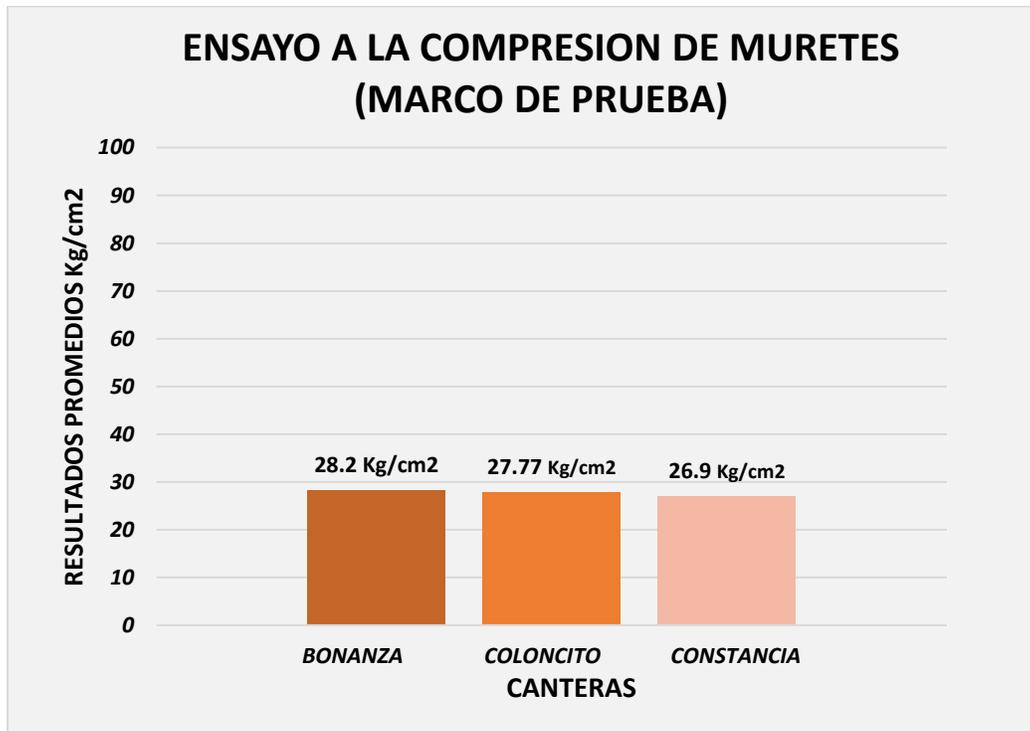
Tabla 17. Resultado Ensayo a Compresión en Muretes. **FUENTE:** (Autores, 2015)

De la tabla anterior se puede resumir que los muretes construidos de las rocas obtenidas en la cantera Coloncito arrojaron una resistencia de 27,77 kg/cm² y los muretes construidos de las muestras procedentes en la cantera Bonanza tuvieron una resistencia de 28,2 kg/cm², mientras que los muretes construidos del material obtenido en la cantera Constanca obtuvieron una resistencia de 26,9 kg/cm².



Ilustración 27. Murete de Coloncito (después de fallar). FUENTE: (Autores, 2015)

Al momento de ensayar los muretes en el marco de prueba, se pudieron notar varios aspectos, uno de ellos y quizás el más importante, es que se tenía previsto que la mayoría de los muros fallaran por la pega (Mortero de Tipología Colonial), pero no fue así, se observó, como se puede ver en la imagen ilustración previa, que los muros fallaron fue por aplastamiento y desintegración de los las piedras, de lo anterior se puede extraer que la pega es una parte importante en la construcción de los muros con que se restaura la escarpa de las murallas, sin embargo al momento de ensayarse o ponerse en uso, la parte más importante es la calidad del material, pues este es quien resiste las cargas aplicadas y es quien ocupa la mayor parte de la escarpa.



Grafica 5. Comparación Resistencia a la Compresión (Marco de Prueba). FUENTE: (Autores, 2015)

Las tres canteras poseen un comportamiento similar al ensayarse como conjunto (Muretes) sus materiales, se puede decir que la cantera Bonanza es ligeramente mejor que las otras dos proveedoras. Bonanza con un resultado promedio de 28,2 Kg/Cm² de resistencia a la compresión es la cantera que se comporta mejor en cuanto a esta característica, este resultado era el esperado, puesto que en los ensayos físicos expuestos en este mismo documentos, las muestras de Bonanza tuvieron más Densidad, menor Porosidad, y menor Desgaste, lo que conllevaba a este resultado, sin embargo no se podía decir esto a priori, ya que desconocíamos el comportamiento como conjunto de los materiales de cada una de las canteras aquí mencionadas.

2.7 RESULTADOS PRUEBA PATRÓN A MATERIALES DE CADA CANTERA.

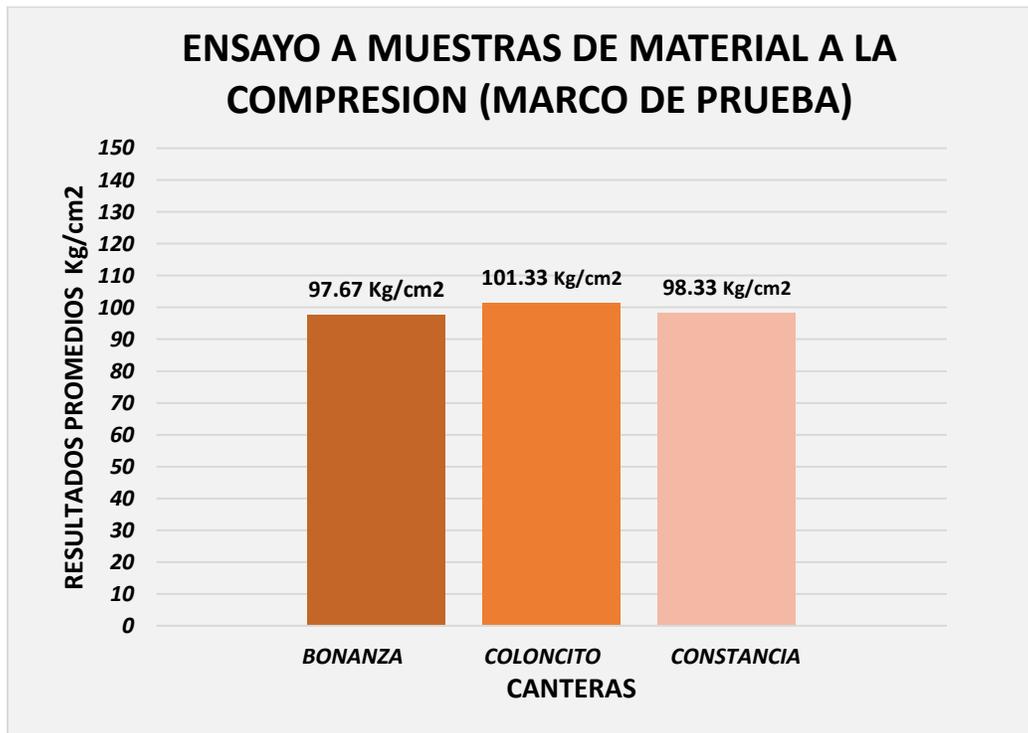
	UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL				
Autores: JOSE DANIEL COGOLLO GALINDO ADALBERTO RAFAEL CORONADO REYES		Fecha: OCTUBRE.2015			
Descripción del Material: CALIZA CORALINA					
ENSAYOS PATRONES A MUESTRAS DE PIEDRAS DE LAS DIFERENTES CANTERAS EN ESTUDIO, ENSAYO A LA COMPRESION EN MARCO DE PRUEBA Y ESCLERÓMETRO					
ENSAYO A MUESTRAS DE PIEDRA CORTADA					
CANTERA	MUESTRA	RESULTADO ESCLEROMETRO Kg/cm ²	RESULTADO MARCO DE PRUEBA Kg/cm ²	PROMEDIO RESULTADO ESCLEROMETRO Kg/cm ²	PROMEDIO RESULTADO MARCO DE PRUEBA Kg/cm ²
COLONCITO	1	105	98	110,67 Kg/cm ²	97.67
	2	117	93		
	3	110	102		
BONANZA	1	95	105	103 Kg/cm ²	101.33
	2	112	98		
	3	102	101		
CONSTANCIA	1	114	102	106,67 Kg/cm ²	98.33
	2	96	99		
	3	110	94		
<p>NOTA :</p> <p>LOS RESULTADOS OBTENIDO EN LA CANTERA COLONCITO FUERON UNA RESISTENCIA DE 110,67 Kg/cm² EN ESCLEROMETRIA Y 97,67 Kg/cm² EN MARCO DE PRUEBA</p> <p>LOS RESULTADOS OBTENIDO EN LA CANTERA COLONCITO FUERON UNA RESISTENCIA DE 110,67 Kg/cm² EN ESCLEROMETRIA Y 101,33 Kg/cm² EN MARCO DE PRUEBA</p> <p>LOS RESULTADOS OBTENIDO EN LA CANTERA COLONCITO FUERON UNA RESISTENCIA DE 110,67 Kg/cm² EN ESCLEROMETRIA Y 98,33 Kg/cm² EN MARCO DE PRUEBA</p>					

Tabla 18. Resultados de Ensayos a Muestras Patrón. FUENTE: (Autores, 2015)

En la tabla anterior se aprecia de manera muy concreta que las muestras de piedra cortada de las canteras estudiadas, Coloncito, Bonanza y Constancia tienen una resistencia a la compresión en promedio igual.

Dado que el principal dato a analizar en esta investigación es la resistencia a la compresión de los muretes construidos con los materiales de cada una de las canteras, y los resultados arrojados mediante el uso del Marco de Prueba fueron muy similares para cada cantera, esto hizo necesario también analizar esta propiedad en los materiales de forma particular para

cantera con el fin de saber si estos también se comportan de manera similar y así poder justificar la similitud en los datos obtenidos mediante la destrucción de los muretes en esta máquina.



Grafica 6. Resultados Resistencia a la Compresión (Marco de Prueba) Muestras de cada cantera. FUENTE: (Autores, 2015)

En la grafica 6 que representa la resistencia a la compresión en las muestras de material de cada cantera, se denota un comportamiento similar al obtenido en los muretes tambien mediante el uso de esta misma maquina (Marco de Prueba), donde las tres canteras en aquel caso representadas en muretes arrojaron datos similares.

Sin embargo aquí la diferencia radica en la resitencia a la compresión obtenida en los muretes y la obtenida aquí en las muestras particulares. En los muretes se obtuvieron datos promediados de 27,62 Kg/Cm², mientras que en las muestras individuales 99,11 Kg/Cm², lo que deja a los muretes con una resistencia aproximadamente del 28% de lo que puede soportar una muestra tallada de ese mismo material.

De lo anterior se infiere que al momento de construir el murete el mortero de pega y la técnica usada por el maestro de construcción influyeron de manera negativa en la resistencia a la compresión del murete como tal y sumarle a eso que los muretes al tener mayor tamaños son elementos más inestables y con mayor dificultad de manejo en la superficie del marco de prueba. Esto debe tenerse muy en cuenta al momento de realizarse las restauraciones futuras en la escarpa de las murallas de Cartagena de Indias.

5.8 RESULTADO Y ANALISIS DE PRUEBAS DE ULTRASONIDO EN LA ESCARPA DE LAS MURALLAS

TRAMO	VELOCIDAD DE ONDA (M/s)	VELOCIDAD DE ONDA PROMEDIO (M/s)	DENSIDAD APARENTE (Gr/Cm ³)	DENSIDAD APARENTE PROMEDIO (Gr/Cm ³)	DENSIDAD REAL (Gr/Cm ³)	DENSIDAD REAL PROMEDIO (Gr/Cm ³)	POROSIDAD PROMEDIO TOTAL (%)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Kg/Cm ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION PROMEDIO (Kg/Cm ²)
1	3410.45	3391.75	2.14	2.16	2.34	2.3	3.2	110.4	108.8
	3394.14		2.19		2.28			103.5	
	3370.65		2.15		2.29			112.5	
2	3403.12	3491.59	2.13	2.13	2.3	2.28	3.15	99.5	104
	3480.78		2.11		2.27			100.3	
	3590.87		2.14		2.25			112.2	
3	3200.45	3438.31	2.16	2.14	2.23	2.25	3.14	113.3	113.1
	3710.34		2.15		2.26			114.5	
	3404.14		2.1		2.27			111.4	

Tabla 19. Resultado Ensayo De Ultrasonido en La Escarpa. FUENTE: (Los Autores, 2015)

En la escarpa de las murallas en Cartagena de Indias (Tramo Baluarte San Pedro Mártir – Las Bóvedas) se realizaron 3 pruebas de ultrasonido, un punto por cada tramo, los tramos los dividimos de acuerdo a las separaciones entre ellos y por la facilidad del ensayo, puesto que en las esquinas era más fácil instalar el equipo y los datos obtenidos tendrían menor interferencia de otros materiales que componen las murallas.

En consecuencia los tramos quedaron de la siguiente manera: el tramo 1 es en la esquina ubicada justo al lado de los semáforos al frente de la india catalina, el tramo 2 es el que está en frente de la calle que conduce a la casa de Antonio Nariño, diagonal al nuevo “Mega Tienda”, y por último el tramo 3 está definido en la esquina al lado de la puerta por donde se ingresa a las bóvedas.

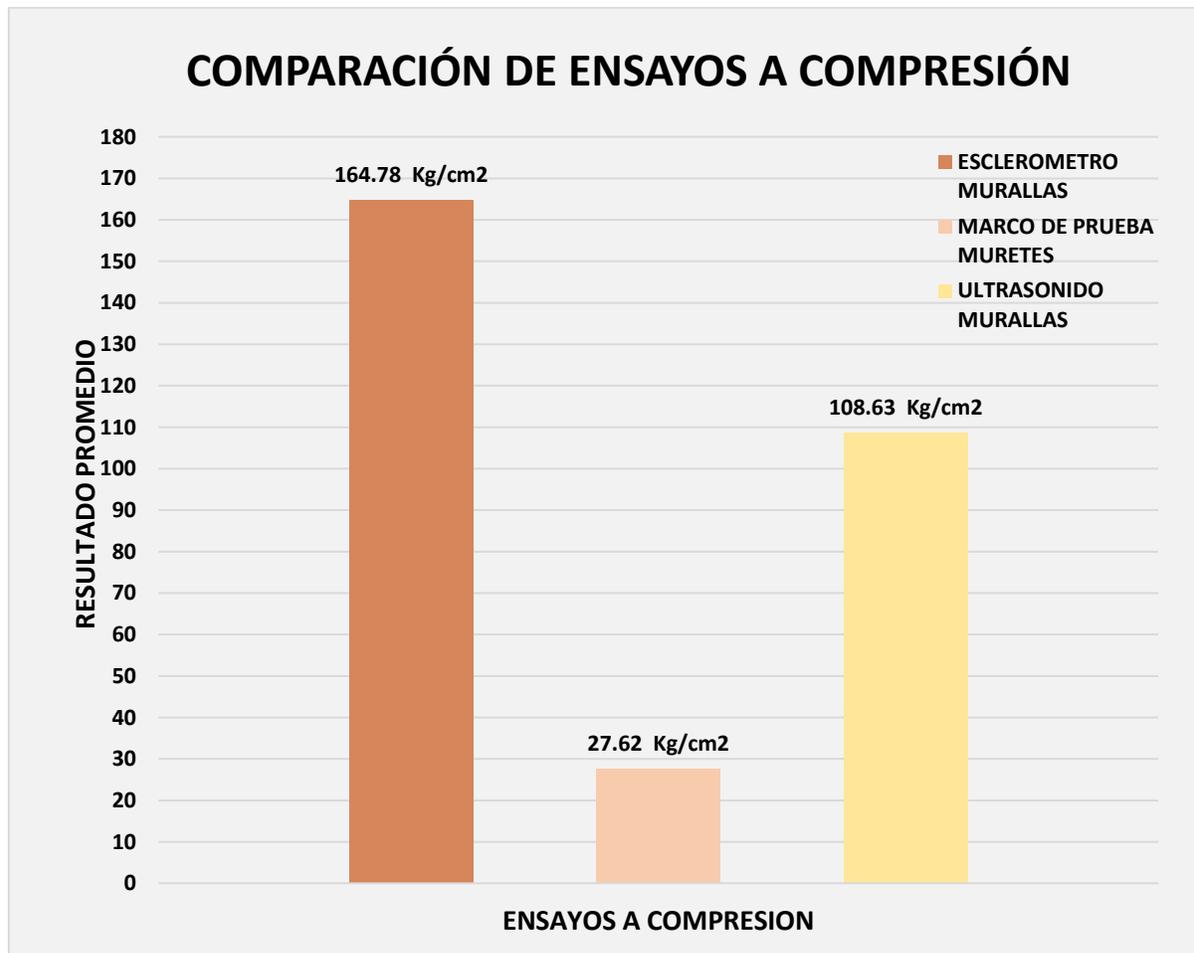


Teniendo clara la ubicación de los tramos en donde se realizaron los puntos de ultrasonido, se puede entender ahora si la tabla de resultados mostrada anteriormente, donde se es notorio que los resultados en cada tramo son muy semejantes, de lo que se puede inferir que el material fue extraído de la misma cantera o que estos materiales a pesar de venir de diferentes canteras poseen propiedades similares.

Entrando en el análisis de estos datos obtenidos por medio de la prueba de Ultrasonido, nos encontramos con una resistencia a la compresión en el rango de 99.5 Kg/Cm^2 a 114.5 Kg/Cm^2 . Teniendo en cuenta los resultados previos en esta investigación referentes a la resistencia la compresión en la escarpa mediante Esclerómetro y a los muretes con el uso del marco de prueba, que fueron 164.78 Kg/Cm^2 y $28,2 \text{ Kg/Cm}^2$ respectivamente, se puede observar que hay una diferencia bastante grande, por lo que se podría concluir arbitrariamente que los materias con que se construyeron los muretes no son ideales para realizar este tipo de restauración, pero como pudieron haber otros factores que afectaron los resultados de los muretes en el marco de prueba, entonces decidimos ensayar muestras de cada cantera en el marco de prueba, obteniendo un resultado promedio de 99.11 Kg/Cm^2 .

Teniendo este resultado con un valor muy similar al obtenido por ultrasonido en la escarpa y mucho más cerca al calculado por esclerometría, se puede deducir que si hay un comportamiento similar entre los materiales, y que la dispersión en los muretes debe ser investigada a fondo con otros recursos que no se poseen en este momento para la investigación.

5.9 COMPARACIÓN GENERAL DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN



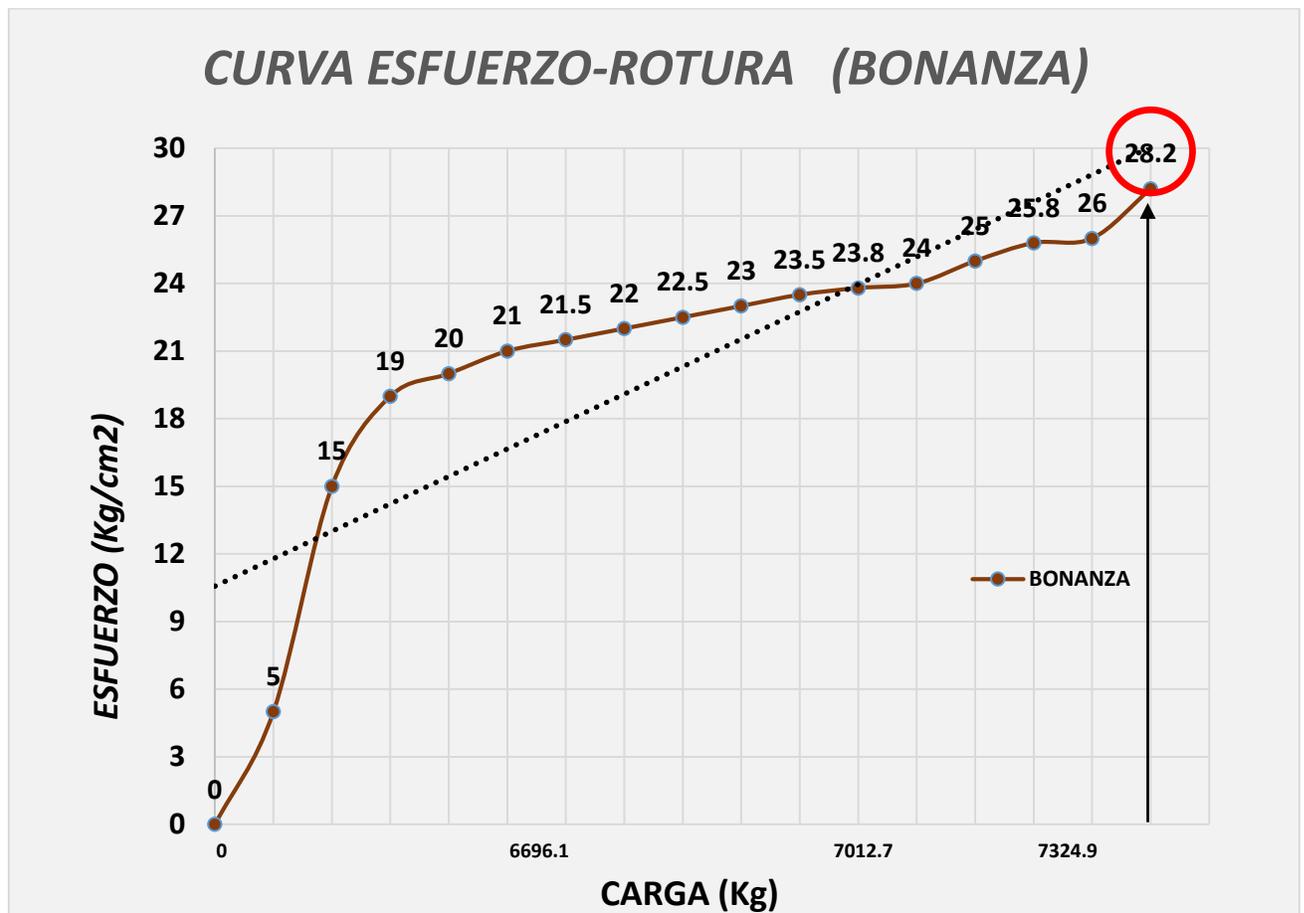
Grafica 7. Comparación general ensayos a Compresión. FUENTE: (Autores, 2015)

Teniendo en cuenta todos los resultados anteriores con respecto al ensayo a compresión se procedió a realizar el anterior grafico de barras donde se pueden observar las Resistencias a la compresión obtenidas por los diferentes métodos planteados en este trabajo de grado, también se puede ver claramente lo dicho anteriormente cuando se analizaron los datos obtenidos mediante ultrasonido, y era que la resistencia a la compresión dada por los muretes en el marco de prueba estaba muy por debajo de las obtenidas por otros sistemas, donde

también se aclaró que esto se debe a otros factores que se salen del alcance de esta investigación, que vale la pena que sean investigados en trabajos futuros, puesto que también se encontró que los materiales si trabajan de forma muy similar.

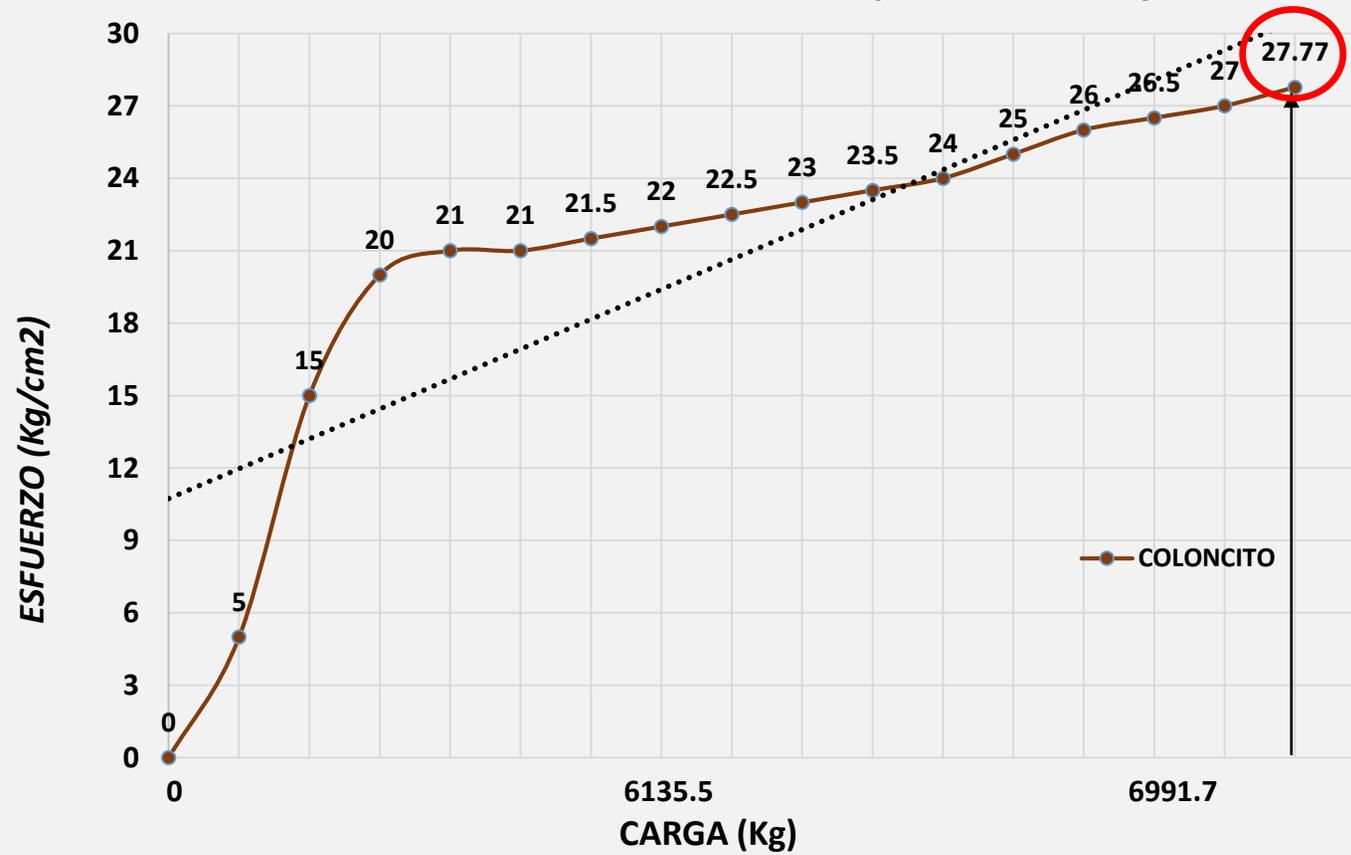
5.10 CURVAS ESFUERZO – ROTURA

A continuación se pueden observar las gráficas del comportamiento de los muretes construidos con los materiales de cada una de las canteras analizadas en esta tesis cuando se le aplicaron las diferentes cargas, hasta que el murete fallase, ya sea por rotura, aplastamiento o desprendimiento de material.

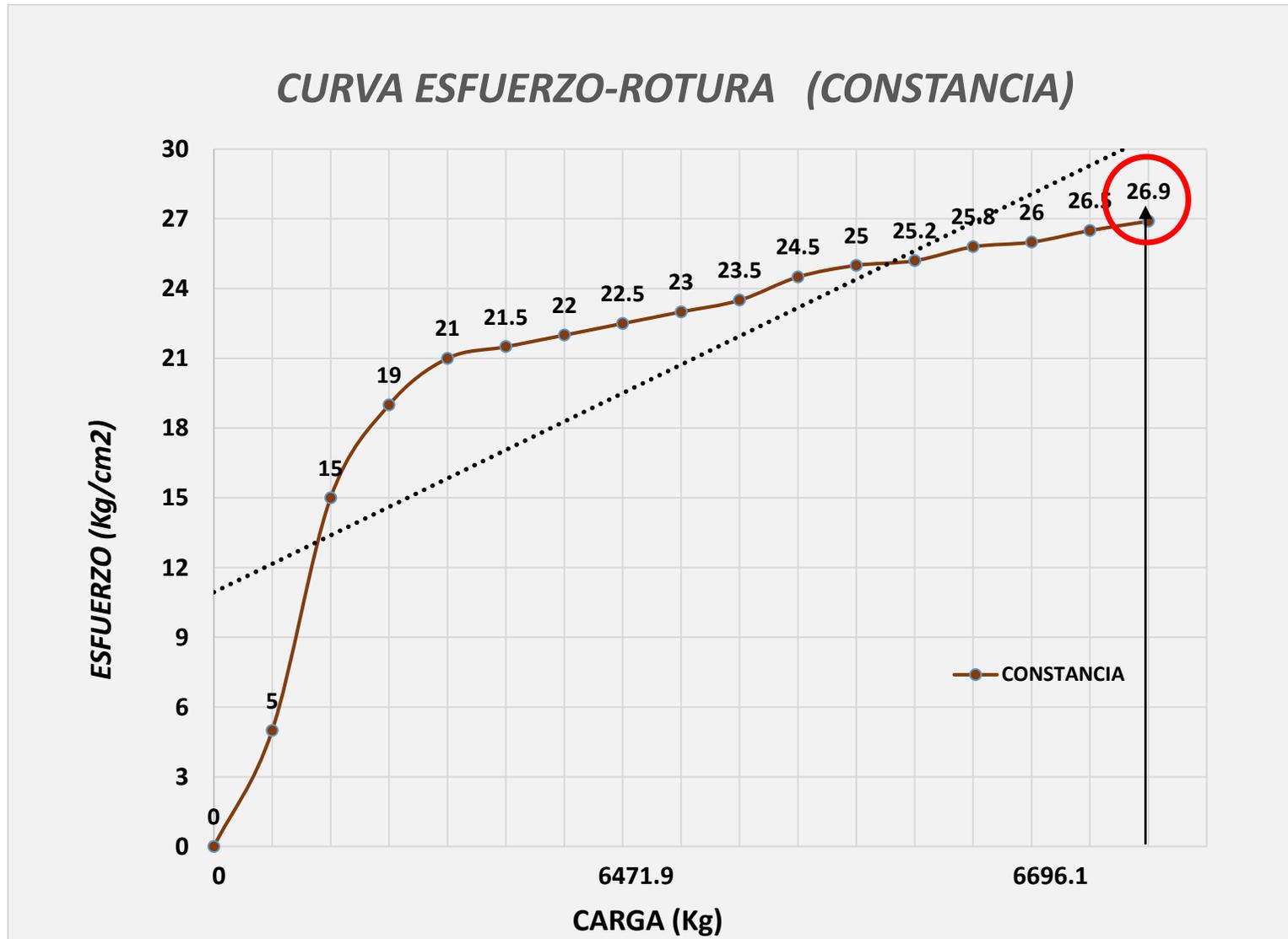


Grafica 8. Curva Esfuerzo - Rotura (Cartera Bonanza). FUENTE: (Autores, 2015)

CURVA ESFUERZO-ROTURA (COLONCITO)



Gráfica 9. . Curva Esfuerzo - Rotura (Cantera Coloncito). FUENTE: (Autores, 2015)



Grafica 10. . Curva Esfuerzo - Rotura (Cantera Constancia). FUENTE: (Autores, 2015)

6. CONCLUSIONES

1. Las restauraciones llevadas a cabo en el tramo de muralla (Baluarte San Pedro Mártir – Las Bóvedas) con el material proveniente de las canteras (Coloncito, Bonanza y la Constancia), al ser analizadas mediante la comparación de muretes de mampostería frente a los datos de ensayos no destructivos en las murallas (Esclerómetro y Ultrasonido). Se encontró que las muestras pétreas extraídas de estas canteras, al ser ensayadas como muretes pegados con mortero de tipología colonial (Conjunto) poseen una resistencia a la compresión de un 28.6 % de la obtenida en promedio en las murallas mediante los ensayos previamente descritos que fueron de 108.63 Kg/Cm² en el ultrasonido y 164.78 Kg/Cm² con el Esclerómetro.
Teniendo en cuenta el resultado obtenido en el marco de prueba, los muretes de mampostería (Representación a escala de la escarpa de las murallas) no alcanzan un 30% de la resistencia a la compresión en comparación con el resultado promedio de los 3 puntos ensayados con el ultrasonido en la escarpa original (Material antiguo). Se concluye que estas muestras al trabajar como conjunto tienen una resistencia a la compresión muy baja en comparación con la de la escarpa, por tanto se determina que no son convenientes las restauraciones realizadas con estos materiales teniendo en cuenta los criterios y la metodología empleada en esta investigación.
2. El material extraído de las canteras (Coloncito, Bonanza y la Constancia) obtuvo una resistencia a la compresión de 102.1 Kg/Cm² con una desviación estándar de 1.11% que al ser comparado paralelamente con el resultado obtenidos para este mismo parámetro en los muretes ensayados mediante marco de prueba y en la escarpa por medios no destructivos. Se encontró que el material al ser testeado a la compresión por separado y no como como conjunto (murete) tiene una resistencia a la compresión muy buena, bastante cercana a la que se obtiene en la escarpa que va de 108.63 Kg/Cm² a 164.78 Kg/Cm². Por lo que se concluyó que los materiales como tal poseen una resistencia similar a la del material antiguo y que la disminución a 28,67 Kg/Cm² en los muretes de material nuevo se debe a cambios significativos en el mortero usado, puesto que la cal usada antiguamente era una cal más pura, con mejores

propiedades cementante, de eso se desprenden las situaciones de que actualmente se esté usando adiciones de cemento para mejorar esa propiedad en los morteros de cal hidráulica (España Moratto, Puello Mendoza, & Almanza Vasquez, 2009). Sin embargo cabe mencionar que la cal no es todo el problema en los muretes, pues el material se observaba muy poroso en algunos miembros y por esas piezas fallaba primero.

3. El material extraído de las canteras (Coloncito, Bonanza y Constancia) tiene propiedades físicas muy similares entre ellos, con ligeras variaciones siendo el material de la cantera Bonanza el cual cuenta con mejores condiciones, dado que es el que posee mayor resistencia al desgaste, 22% en relación con las obtenidas en Coloncito y Constancia, que fueron 33% y 38% respectivamente, así como también teniendo en cuenta los demás datos resumidos a continuación:

ENSAYOS FISICOS A MATERIAL				
	ENSAYOS			
CANTERA	GRAVEDAD ESPECIFICA	ABSORCION (%)	DESGASTE (%)	HUMEDAD (%)
CANTERA BONANZA	2.54	3.37	27.02	2.4
CANTERA COLONCITO	2.5	3.35	33.17	3
CANTERA CONSTANCIA	2.23	5.54	38.5	9.6

Tabla 20. Resumen ensayos físicos. FUENTES: (Autores, 2015)

Se determinó que por diferencias muy pequeñas la cantera Bonanza tiene el material con propiedades físicas mejor adaptadas para la restauración de la escarpa de la murallas, en el tramo evaluado, puesto que tiene una más alta densidad, y menor contenido de humedad, así como una capacidad absorbente muy baja.

4. En la escarpa de las murallas del tramo evaluado se obtuvieron en los 3 puntos de ultrasonido llevados a cabo resultados de Densidad, Porosidad y Resistencia a la Compresión muy similares en cada punto, por lo que se puede inducir que el material usado antiguamente para la construcción de este fragmento de muralla se extrajo de la misma fuente de material.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Dado el resultado desfavorable (inferior al esperado) en los muretes ensayados en el marco de prueba, se recomienda llevar a cabo otro tipo de ensayos mecánicos como son los de flexión y cargas axiales, para poder determinar en un futuro a mayor precisión que propiedad es la que hizo que los muretes no trabajaran de la forma que se esperaba. Cabe mencionar que este tipo de ensayos no se realizaron porque estaban fuera del alcance dado que la universidad no cuenta con los equipos necesarios, y tampoco los laboratorios cercanos que se consultaron.

- ✓ Es recomendable para efectos investigativos llevar a cabo ensayos químicos a las muestras de las canteras estudiadas en esta tesis, con el fin de saber si quizás la reacción con el mortero de pega de estas muestras de material generen alguna reacción química que perjudique los procesos de restauración que no se esté teniendo en cuenta hasta ahora en dichas intervenciones.

- ✓ De igual forma se recomienda un estudio químico a la escarpa de las murallas, para determinar que otros factores se deben tener en cuenta que deben poseer los materiales que se vayan a usar en restauraciones futuras desde este punto de vista químico, puesto que la ubicación de esta estructura colonial la tiene en contacto directo con agentes químicos bastante fuertes como sales y compuestos oxidantes que aumentan el deterioro de sus componentes y disminuyen sus funciones estructurales y estéticas.

- ✓ Se recomienda estudiar otras canteras que se encuentran cercas de la ciudad que podrían proveer también un material con condiciones aceptables o sobresalientes para restauraciones de este u otros tramos del sector amurallado que necesiten ser rehabilitaciones en un futuro.

8. BIBLIOGRAFIA

- Alcaldía de Cartagena. (4 de Marzo de 2015). *Historia de Cartagena*. Obtenido de <http://www.cartagena-indias.com/historia.html>.
- Arcillas de Colombia. (2011). *Historia del Ladrillo*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de <http://www.arcillasdecolombia.com>
- Buendía Atencio, C., & Barbosa López, A. (2006). *Estudio físicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena de Indias*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Cartagena, A. d. (12 de 04 de 2015). *Cartagena Caribe*. Obtenido de <http://www.cartagenacaribe.com/historia/historia.htm>
- Cartagena-Caribe. (2013). *Historia Cartagena de Indias*. Recuperado el 12 de Abril de 2015, de <http://www.cartagenacaribe.com/historia/historia.htm>
- Crespo Escobar, S. (2009). *Materiales de Construcción para edificación y obra civil* (Original ed., Vol. I). Alicante, España. Recuperado el 12 de Febrero de 2015
- Crúz Guzman, A. (23 de Febrero de 2011). *Enfoque mixto de la investigación y estilos de redacción*. Obtenido de <http://cursos.tecmilenio.edu.mx/cursos/apoyos/11.pdf>
- EL TIEMPO. (27 de Diciembre de 2014). *eltiempo.com*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13318279>
- España Moratto, J., Puello Mendoza, E., & Almanza Vasquez, E. (2009). Resistencia estructural empírica de la mampostería de tipología colonial en Cartagena de Indias. *Revista Educación en Ingeniería, ISSN 1900-8260*.
- Evelio, J., & Flores Valdes, E. (2004). Estudio de los efectos de la disolución kárstica y la erosión, en las obras patrimoniales de la "Villa de San Cristóbal de la Habana. La Habana, Cuba.
- Falcon Rodriguez, L. (2010). *Propuesta de intervención de las edificaciones patrimoniales de la ciudad de Matanzas en Cuba*. Obtenido de http://universidadpatrimonio.net/doc/doc/2_1_10.pdf, 2010
- Fernandez Torres, G. P., & Palencia Cantillo, S. P. (2014). *Estudio De Las Propiedades Físicas Y Mecánicas De Los Materiales Pétreos Extraídos De La Isla De Tierrabomba*. . Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Fernandez Torres, G. P., & Palencia Cantillo, S. P. (2014). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES PÉTREOS EXTRAÍDOS EN TIERRABOMBA*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Fernandez Torres, G., & Palencia Cantillo, S. (2014). *Estudios de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de Tierra Bomba para comprobar su uso en la*

construcción de las murallas de Cartagena de Indias y compararlo con el utilizado actualmente su restauración proven. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

Flores, V., Arroyo, R., & Barragan, R. (2013). Propiedades Mecanicas de la Mamposteria de Tabique Rojo recocido utilizada en Chilpancingo. *Informes de La Construcción*, 65,531, 387-395.

GuiaTodo Colombia. (14 de Diciembre de 2013). *GuiaTodo*. Recuperado el 20 de Abril de 2015, de http://www.guiatodo.com.co/Sitio/cartagena/la_muralla_de_cartagena

Institut Promocio Cerámic. (10 de Febrero de 2010). *IPC*. (Diputació De Castello) Recuperado el 2015, de http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/mat_agarre/morteros/morteros_cal.html

INVIAS. (2007). *INVE - 223-07*. Colombia.

Meza , M., & Cohen, J. (2011). *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales en el departamento de Bolívar para restaurar las Murallas*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

Ministerio de Cultura. (2007). *Manual de uso temporal y aprovechamiento económico de las Murallas de Cartagena*. Bogota D.C: MinCultura. Recuperado el 21 de Abril de 2015, de <http://www.fortificacionesdecartagena.com/es/manual-uso-murallas.pdf>

Puertos de Cartagena, Santa Marta y Providencia. (27 de Diciembre de 2014). *Ministerio de Comercio, Industria y Turismo*. Obtenido de <http://www.mincit.gov.co/publicaciones.php?id=16590>

Región Murcia digital. (Accesado[27 de Febrero de 2015]). *La Caliza*. Artículo de internet.

Revista SEMANA. (23 de Marzo de 2012). *Semana.com*. Obtenido de <http://www.semana.com/especiales/patrimonios-colombia-humanidad/cartagena>

RODOLFO, S. (12 de 04 de 2015). Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad. Colombia. Obtenido de Atlas histórico de Cartagena de Indias: Paso a paso, la construcción civil, militar y religiosa de la ciudad: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/noviembre2001/cartagena>

Sociedad de mejoras publicas de Cartagena. (2010). Fortificaciones de Cartagena. *Sociedad de Mejoras Publicas de Cartagena*.

Teran, J. (2004). Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. *Conserva*.

Torok, A., & Priktyl, R. (2010). *Current Methods And Future Trends In Testing, Durability Analyses and Provenace Studies Of Natural Stones Used In Historical Monuments*. Budapest: University of technology.

Universidad Nacional de Colombia. (15 de abril de 2006). Determinación del tamaño de muestras. Manizales, Colombia.



