

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS MATERIALES PETREOS EXTRAIDOS DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA COMPROBAR SU USO EN LA CONSTRUCCION DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS Y COMPARARLO CON EL UTILIZADO ACTUALMENTE EN SU RESTAURACION, PROVENIENTE DE LA CANTERA “COLONCITO” EN TURBACO.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS MATERIALES PETREOS EXTRAIDOS DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA COMPROBAR SU USO EN LA CONSTRUCCION DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS Y COMPARARLO CON EL UTILIZADO ACTUALMENTE EN SU RESTAURACION, PROVENIENTE DE LA CANTERA “COLONCITO” EN TURBACO.



**GENIS PAOLA FERNANDEZ TORRES
SANDRA PATRICIA PALENCIA CANTILLO**

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

2014.



RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCION.....	10
1 OBJETIVOS.....	13
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
2. ALCANCE.....	14
3. MARCO DE REFERENCIA.....	146
3.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	136
3.2. MARCO TEORICO.....	26
3.2.1. CARTAGENA, PATRIMONIO HISTORICO Y CULTURAL DE LA HUMANIDAD.....	26
3.2.2. Clasificación y carácter del patrimonio histórico y cultural.....	26
3.2.3. Fortificaciones.....	28
3.3. HISTORIA DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA.....	28
3.4. EVOLUCIÓN DE LAS NORMAS PROTECTORAS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO DE CARTAGENA.....	32
3.4.1. Normas nacionales.....	32
3.4.2. Normas locales, estudios y reglamentaciones específicas.....	34
3.4.3. Criterios para la conservación.....	35
3.4.4. Criterios técnicos de intervención.....	36
3.5. CONSIDERACIONES PARA LA RESTAURACIÓN DE PATRIMONIOS HISTÓRICOS.....	36
Principios teóricos.....	36
3.5.1. Grados de intervención.....	37
3.5.2. Tipos de intervención.....	38
3.6. MARCO CONCEPTUAL.....	40
3.6.1. DEFINICIONES.....	40
3.6.2. MATERIALES QUE COMPONEN LAS MURALLAS.....	46
La Caliza.....	46
La cal.....	48
Ladrillos de arcilla.....	49
Argamasa.....	50
3.7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	50
3.7.1. Densidad.....	50
3.7.2. Porosidad.....	54
3.7.3. Resistencia a la abrasión (Desgaste).....	59
3.7.4. Resistencia a la compresión.....	60
3.7.5. Dureza.....	62
3.8. METODOLOGÍAS NO DESTRUCTIVAS APLICABLES EN OBRAS DE REHABILITACIÓN DE PATRIMONIOS.....	63
3.8.1. Métodos ultrasónicos (Ultrasonido).....	65
3.8.2. Método del esclerómetro o martillo de Schmidt.....	67
4. METODOLOGÍA.....	70
4.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	70

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECANICAS DE LOS MATERIALES PETREOS EXTRAIDOS DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA COMPROBAR SU USO EN LA CONSTRUCCION DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS Y COMPARARLO CON EL UTILIZADO ACTUALMENTE EN SU RESTAURACION, PROVENIENTE DE LA CANTERA "COLONCITO" EN TURBACO.



4.2.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	73
4.3.	ENSAYOS DEL MATERIAL ROCOSO OBTENIDO EN LA CANTERA DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA CONOCER SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	74
5.	RESULTADOS.....	86
5.1.	CANTERAS DE TIERRA BOMBA.....	86
5.1.1.	<i>Densidades y Porosidades</i>	86
5.1.2.	<i>Desgaste por Abrasión</i>	87
5.1.3.	<i>Resistencia a la Compresión</i>	88
5.2.	CANTERA COLONCITO.....	89
5.2.1.	<i>Densidades y Porosidades</i>	89
5.2.2.	<i>Desgaste por Abrasión</i>	91
5.2.3.	<i>Resistencia a la Compresión</i>	91
5.3.	MATERIAL DE MURALLAS	92
5.3.1.	<i>Resistencia a la Compresión</i>	94
5.4.	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES	96
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	104



INDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.</i> Ubicación Isla Tierrabomba.....	15
<i>Ilustración 2.</i> Zona de extracción de material a estudiar.....	15
<i>Ilustración 3.</i> Mapa de ubicación de las murallas y señalización de cada componente.....	18
<i>Ilustración 4.</i> Espigón de la Tenazas.....	19
<i>Ilustración 5.</i> Baluarte San Francisco Javier.....	19
<i>Ilustración 6.</i> Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena.....	32
<i>Ilustración 7.</i> Aljibes.....	41
<i>Ilustración 8.</i> Baluarte San Lucas.....	41
<i>Ilustración 9.</i> Batería de San Juan de Manzanillo.....	42
<i>Ilustración 10.</i> Castillo San Fernando de Bocachica.....	42
<i>Ilustración 11.</i> Contraescarpa.....	43
<i>Ilustración 12.</i> Contraguardia.....	43
<i>Ilustración 13.</i> Contramuralla.....	43
<i>Ilustración 14.</i> Cortina San Juan Evangelista/ San Ignacio.....	44
<i>Ilustración 15.</i> Edificio militar.....	44
<i>Ilustración 16.</i> Garita.....	44
<i>Ilustración 17.</i> Media Luna.....	45
<i>Ilustración 18.</i> Murallas de la Marina.....	45
<i>Ilustración 19.</i> Plataforma de Ballestas.....	45
<i>Ilustración 20.</i> Tenazas.....	46
<i>Ilustración 21.</i> Hipótesis extracción de la piedra.....	47
<i>Ilustración 22.</i> Distribución de poros en la roca.....	57
<i>Ilustración 23.</i> Distribución de los granos.....	57
<i>Ilustración 24.</i> Variación en la forma de los granos.....	58
<i>Ilustración 25.</i> Facturación extensional y por cizalla.....	61
<i>Ilustración 26.</i> Equipo ultrasónico.....	66
<i>Ilustración 27.</i> Martillo de Schmidt.....	68
<i>Ilustración 28.</i> Gráfico de correlación entre el resultado.....	68
<i>Ilustración 29.</i> Aspecto físico de material rocoso de las murallas de Cartagena.....	71
<i>Ilustración 30.</i> Distribución y pega de bloques en las murallas.....	71
<i>Ilustración 31.</i> Extracción de material en canteras de Tierra Bomba.....	74
<i>Ilustración 32.</i> Extracción de material en cantera de Tierra Bomba.....	75
<i>Ilustración 33.</i> Zona de extracción de material.....	75
<i>Ilustración 34.</i> Muestras a ensayar.....	76
<i>Ilustración 35.</i> Muestras sumergidas.....	77
<i>Ilustración 36.</i> Pesaje de muestras.....	77
<i>Ilustración 37.</i> Muestras sumergidas.....	78
<i>Ilustración 38.</i> Pesaje de muestras.....	79
<i>Ilustración 39.</i> Serie de tamices utilizada y muestra a ensayar.....	81
<i>Ilustración 40.</i> Muestra sacada de la Máquina de los Ángeles.....	82
<i>Ilustración 41.</i> Máquina de los Ángeles empleada.....	82
<i>Ilustración 42.</i> Máquina Universal empleada.....	84
<i>Ilustración 43.</i> Muestra al finalizar la prueba.....	84



Índice de Gráficas

<i>Gráfica 1.</i> Desgaste de material de canteras	97
<i>Gráfica 2.</i> Comparación de densidades reales	98
<i>Gráfica 3.</i> Comparación de densidades aparentes	99
<i>Gráfica 4.</i> Comparación de porosidades totales	100
<i>Gráfica 5.</i> Comparación de resistencias a la compresión	101



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Densidades de los principales granos minerales formadores de roca.....	52
<i>Tabla 2.</i> Clases de porosidad	56
<i>Tabla 3.</i> Calidad de la roca en función de la porosidad	58
<i>Tabla 4.</i> Densidad global y porosidad de rocas usadas en construcción.....	58
<i>Tabla 5.</i> Carga abrasiva según el número de esferas.....	60
<i>Tabla 6.</i> Tipo de material según su resistencia a la compresión.....	61
<i>Tabla 7.</i> Escala de dureza de Mohs	62
<i>Tabla 8.</i> Velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas.	67
<i>Tabla 9.</i> Ensayos y propiedades objeto de estudio.....	73
<i>Tabla 10.</i> Gradaciones para ensayo de Desgaste a la abrasión en la máquina de los Ángeles.....	83
<i>Tabla 11.</i> Resultados de Densidad Real en material de la cantera de Tierra Bomba.....	86
<i>Tabla 12.</i> Resultados de Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Total en material de la cantera de Tierra Bomba.....	87
<i>Tabla 13.</i> Resultados de Desgaste por abrasión en material de la cantera Tierra Bomba	87
<i>Tabla 14.</i> Resultados de Resistencia a la Compresión en material de la cantera Tierra Bomba.....	88
<i>Tabla 15.</i> Resultados de Densidad Real en material de la cantera Coloncito.....	89
<i>Tabla 16.</i> Resultados de Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Total en material de la cantera Coloncito.....	90
<i>Tabla 17.</i> Resultados de Desgaste por abrasión en material de la cantera Coloncito	91
<i>Tabla 18.</i> Resultados de Resistencia a la Compresión en material de la cantera Coloncito.....	92
<i>Tabla 19.</i> Resultados de densidad y porosidad del material rocoso de las murallas.....	91
<i>Tabla 20.</i> Resultados de la Resistencia a la compresión en la zona 1.....	94
<i>Tabla 21.</i> Resultados de la Resistencia a la compresión en la.....	94
<i>Tabla 22.</i> Resultados de la Resistencia a la compresión en la zona 3.....	93
<i>Tabla 23.</i> Comparación de propiedades ensayadas para cada material.....	94



RESUMEN

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.

Según la literatura los monumentos históricos de la ciudad de Cartagena fueron construidos con materiales obtenidos de canteras cercanas¹, 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 provino de Tierra Bomba. Adicionalmente se compararon las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas y el utilizado para su restauración, y comprobar si dicho material es óptimo para restaurar este tipo de obras. Para su cumplimiento, se desarrolló una investigación de tipo mixto en la cual se realizó una revisión bibliográfica del tema, ensayos de laboratorio al material rocoso de canteras de la isla de Tierra Bomba para conocer propiedades importantes como la Densidad, Desgaste, Resistencia a la Compresión y Porosidad, también se utilizó información secundaria para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material constitutivo de las murallas y el utilizado para su restauración.

Como resultado de esto, se encontró que el material extraído de canteras de Tierra Bomba es 63,44% menos resistente que el de coloncito y coincide solo con la zona 3 de las murallas, (Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier), con una resistencia a la compresión de 110,52 kg/cm² y porcentaje de desgaste del 33,70 %. La diferencia porcentual entre densidades es de 1,43% y 0,25% para la porosidad total. El material de Coloncito coincide con la zona 2, (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago), con diferencias porcentuales de densidades de 1,75%, resistencia a la compresión 6,99% y porosidad total de 1,75%. Estos resultados confirman la

¹Segovia, Rodolfo. Fortificaciones de Cartagena de Indias, Carlos Valencia editor.
<<http://es.scribd.com/doc/36107723/Las-Fortificaciones-de-Cartagena-de-Indias>>, 1982

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS MATERIALES PETREOS EXTRAIDOS DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA COMPROBAR SU USO EN LA CONSTRUCCION DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS Y COMPARARLO CON EL UTILIZADO ACTUALMENTE EN SU RESTAURACION, PROVENIENTE DE LA CANTERA "COLONCITO" EN TURBACO.



utilización del material de la isla de tierra bomba en la construcción de las murallas de Cartagena y avala la utilización del material de coloncito para obras de restauración.



ABSTRACT

At the time of restoration of historical monuments, you should use materials having similar physical and mechanical properties that were used to build the original structure, so that aesthetic harmony is preserved and the continuity of its forms is restored.

According to literature landmarks of the city of Cartagena were built with materials obtained from nearby quarries, especially its walled lace, therefore, the aim of this study was to confirm this and show that the material used for the construction of the walls came from Tierra Bomba, Additionally the physical and mechanical properties of rock material that forms the structure of the walls and used for restoration, and check if the material is optimal to restore these works were compared. For compliance, investigation of mixed type in which a review of the literature, laboratory tests to rock material quarry on the island of Tierra Bomba for important properties such as density, wear, resistance was performed was developed Compression and porosity, secondary information was also used to evaluate the physical and mechanical properties of the material constituting the walls and used for restoring properties.

As a result, it was found that the material extracted from quarries Tierra Bomba is 63.44 % less resistant than Coloncito and coincides with the area only 3 of the walls (Baluarte Santiago to Baluarte San Francisco Javier) with a compressive strength of 110.52 kg / cm² and attrition rate of 33.70 %. The percentage difference between densities is 1.43 % and 0.25 % for the total porosity. Coloncito material coincides with the zone 2 (Baluarte La Merced to Baluarte Santiago), with percentage differences in densities of 1.75 %, compressive strength total porosity 6.99% and 1.75 %. These results confirm the use of the material ground island bomb in the building of the walls of Cartagena and support the use of material Coloncito for restoration.

INTRODUCCION

Cartagena de Indias es uno de los destinos turísticos más visitados por gente de todo el mundo, esto se debe a su gran atractivo como son los monumentos históricos que aún se conservan en la ciudad, y la posicionan como una de las más fortificadas de América, entre estos monumentos se encuentran las fortificaciones que fueron levantadas con el fin de proteger la ciudad de las invasiones en la época de la colonia, siendo el Cordón Amurallado su mayor distintivo.

Al pasar los años las murallas han sufrido un deterioro notable en su arquitectura original ocasionado por el ataque salitroso del medio ambiente de la ciudad debido a que se encuentran a orillas del mar, el factor antropogénico y la misma edad de la estructura que han influenciado al cambio en el aspecto de las mismas, Con el fin de no minimizar su valor histórico, estos monumentos deben ser conservados y restaurados de tal forma que no pierdan su atractivo visual ni su resistencia estructural. Esto es posible utilizando materiales con características físicas y mecánicas similares a los utilizados en su construcción.

Se han realizado una serie de 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 del 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. En las murallas se observan grietas, ya subsanadas, con capas de mortero que cambian la técnica constructiva utilizada, también se observan algunos bloques de piedra, que pueden ser ligeramente distintos a los del resto de la estructura, pero mejoran la fachada de la fortificación. Todas estas sustituciones de material o refuerzo de los existentes son realizados debido a que, por los años de existencia de esta estructura, se ha estado debilitando en algunos sectores, lo que obliga a tomar medidas correctivas para evitar su total deterioro. Sin embargo, aunque encontramos principios que deben tenerse en cuenta al momento de realizar labores de restauración, no existen normas que regulen paso a paso este tipo de obras, y no se dispone de los mismos materiales ni métodos constructivos, motivo por el cual se han utilizado materiales que difieren mucho de la composición original.

Esta práctica puede conllevar a la pérdida del valor patrimonial y estético del monumento, por lo cual es de vital importancia esta investigación.²

En diferentes ciudades del mundo existen murallas y/o monumentos que, por su valor histórico, deben ser restaurados, lo que ha llevado a realizar muchas investigaciones, estudios y artículos en torno a esto se han buscado metodologías que sirvan para evaluar el estado de estas construcciones, se han hecho estudios de diagnóstico no destructivos y bajo-destructivos en el sitio con el fin de comprender el comportamiento de las piedras que componen las estructuras, en condiciones ambientales. En las murallas de Cartagena se efectuó un estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo y se han realizado algunas pruebas a materiales con los que se han efectuado restauraciones sobre esta.

Destacando que las obras de restauración han sido realizadas, principalmente, por Arquitectos, que se basan en su experiencia y teorías empíricas, sin embargo, dentro de la formación del Ingeniero Civil existe la Ingeniería de materiales, que ayuda a conocer cuáles son las propiedades que se deben evaluar para avalar el buen comportamiento de dichos materiales a nivel estructural, mediante el uso de técnicas que se han valorado científicamente. Debido a esto, la Universidad de Cartagena mediante el grupo de investigación *Ciencia y Sociedad* de la Facultad de Ingeniería, siguiendo la línea de investigación “*Conservación y consolidación de monumentos*” consideró necesario la concentración de esfuerzos y recursos en pro de evaluar el material rocoso constitutivo de las murallas y comparar sus resultados con insumos disponibles en canteras cercanas.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue comprobar si la fuente de material (canteras), que hipotéticamente se usaron en la construcción de las Murallas fue extraído de Tierra Bomba como lo dice la literatura histórica³, esto mediante ensayos destructivos y no destructivos para encontrar similitud entre el material que compone las murallas y el obtenido de estas canteras y así corroborar este hecho histórico. Adicionalmente se compararon las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la

²(Rhenals& Santos,2012)

³ Segovia, Rodolfo. Fortificaciones de Cartagena de Indias, Carlos Valencia editor.
<<http://es.scribd.com/doc/36107723/Las-Fortificaciones-de-Cartagena-de-Indias>>, 1982

estructura de las murallas y el utilizado actualmente para su restauración y rehabilitación, y comprobar si dicho material es óptimo para restaurar este tipo de obras, y así garantizar la conservación de las características del monumento.

Con el fin de responder a las preguntas de investigación, “¿Se utilizó el material pétreo proveniente de la isla de Tierra Bomba en la construcción de las murallas de Cartagena? ¿El material pétreo proveniente de Coloncito se podrá utilizar para la restauración de las murallas de Cartagena?”, fue necesario realizar una comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre los 3 materiales (Tierra Bomba, Coloncito y el de las Murallas comprendido entre el Fuerte de la Tenaza y el Baluarte San Francisco Javier) para encontrar similitudes y así corroborar el hecho histórico de la utilización del material de Tierra Bomba en la construcción de las murallas y evaluar si el material rocoso de Colocito es apropiado para utilizarlo en la restauración de las mismas.

1 OBJETIVOS.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos extraídos de la isla de tierra bomba con los materiales constitutivos de las murallas de Cartagena de Indias y comprobar su uso en la construcción de las mismas y a su vez compararlo con el utilizado actualmente en su restauración, proveniente de la cantera “Coloncito” en Turbaco.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar las características físicas y mecánicas de los materiales encontrados en las murallas de Cartagena y la cantera Coloncito en Turbaco mediante información secundaria.
- Ensayar los materiales obtenidos en las canteras ubicadas en la isla de Tierra Bomba para conocer sus propiedades físicas y mecánicas.
- Deducir a partir de la comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre los 3 materiales (Tierra Bomba, Coloncito y el de las Murallas) su similitud para corroborar el hecho histórico de la utilización del material de Tierra Bomba en la construcción de las murallas y evaluar si el material rocoso de Colocito es apropiado para utilizarlo en la restauración de las mismas.

2. ALCANCE

El estudio comparativo entre el material extraído de canteras de Tierra Bomba y los resultados obtenidos del estudio realizado al material de la cantera Coloncito en Turbaco y de las murallas de Cartagena de Indias, en la investigación previa realizado por egresados de la Universidad de Cartagena titulado “ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MATERIAL ROCOSO QUE CONSTITUYE LA ESTRUCTURA DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA Y EL UTILIZADO PARA SU RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN” (Rhenals& Santos,2012), se llevó a cabo para determinar propiedades similares entre ellos y concluir si este material se usó para la construcción de las murallas de Cartagena de Indias.

Este estudio se realizó tomando los resultados obtenidos de los ensayos del material de Coloncito y de la zonas de las murallas comprendidas así: Zona 1 (Fuerte de la Tenaza hasta el Baluarte La Merced), zona 2 (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago) y zona 3 (Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier) contiguo a la Avenida Santander, para establecer cuál de estos materiales se adaptan mejor a los requerimientos de la estructura existente con el fin de no perder su denominación de Patrimonio Histórico y Cultural de la humanidad.

Finalmente se realizó un análisis comparativo de los resultados en los tres casos, para determinar si estos materiales poseen características físicas y mecánicas similares. Como restricción a la realización de la investigación, no se tuvo en cuenta el deterioro de las murallas por asentamientos, ni el comportamiento geotécnico del suelo, debido a que nos enfocamos en la comparación de las características físicas y mecánicas del material extraído en Tierra Bomba (ver ilustración 1 y2), el de Coloncito en Turbaco y el material constitutivo de las murallas.



Ilustración 1. Ubicación Isla Tierrabomba.
Fuente: (Google maps, 2014)

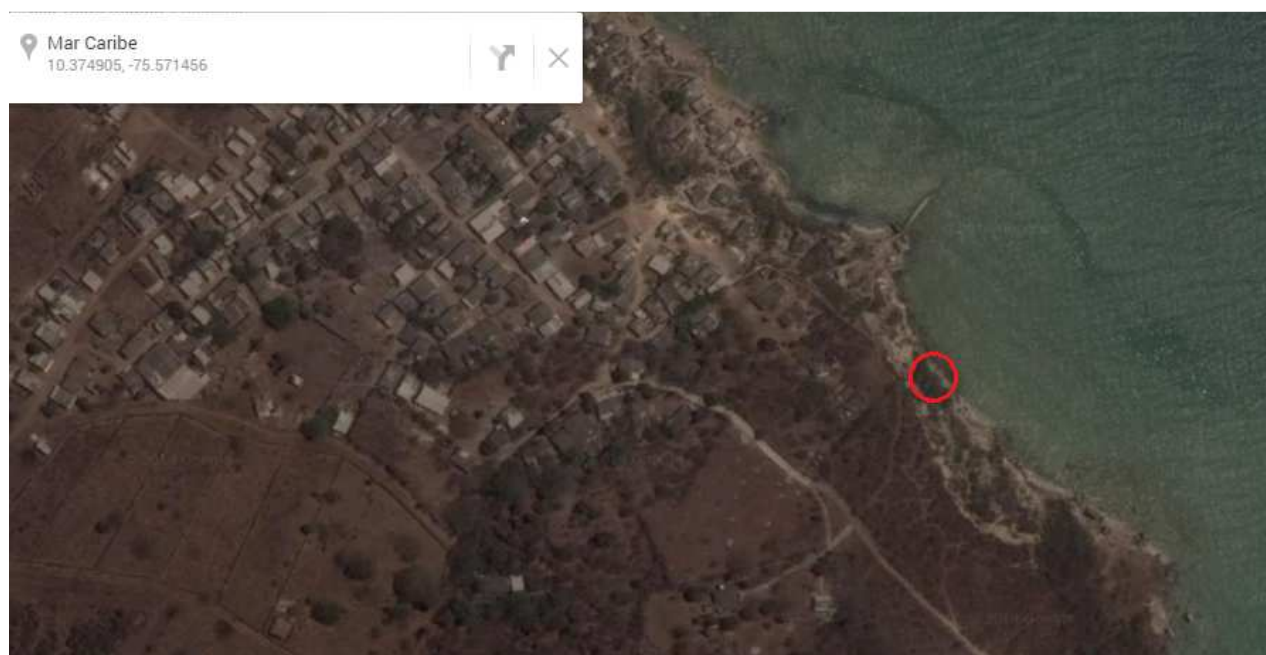


Ilustración 2. Zona de extracción de material a estudiar
Fuente: (Google maps, 2014)

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Desde la época del renacimiento se intensificaron y direccionaron los estudios para realizar las restauraciones de los monumentos y edificios antiguos debido a la importancia que han tomado como estructuras significativas y llenas de valor histórico. Estas investigaciones se hacen con base en datos arqueológicos conocidos y en supuestos o hipótesis; ya que estos representan un gran valor artístico e histórico para el sitio donde están ubicados. Por eso se busca hacer las intervenciones necesarias a estas edificaciones con la mínima alteración posible a su aspecto original, usando sus materiales originales o materiales que sean similares en sus características físicas y mecánicas.⁴

En Cartagena se encuentran muchas construcciones que representan un valioso patrimonio a nivel regional y mundial, entre esas están el lienzo de fortificaciones del centro histórico, las cuales han estado expuestas a diversos factores ya bien sean naturales o de intervención humana que han hecho que éstas se deterioren. Durante muchos años se han realizado investigaciones con el fin de determinar los procesos adecuados para su mantenimiento o restauración, las cuales deben ser parciales porque no se puede modificar o alterar en su totalidad por su estilo colonial.

El cordón de murallas del Centro Histórico de Cartagena de Indias es un bien de interés nacional e internacional, cuyo valor cultural fue reconocido con la promulgación de la Ley 5 de 1940; posteriormente fue declarado monumento nacional mediante la Ley 163 de 1959; igualmente, y como consecuencia de sus características, únicas en América Latina, el puerto, la fortaleza y el conjunto monumental fueron incluidos en 1984 en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, lo que conlleva un permanente compromiso del Estado colombiano de proteger estos bienes, el que consiste principalmente en una eficiente y adecuada administración, conservación y mantenimiento de los mismos para garantizar su disfrute por las generaciones actuales y futuras.

Los materiales utilizados en la construcción de las murallas de Cartagena son principalmente piedra caliza de origen coralino y sedimentario extraída de canteras ubicadas cerca de la

⁴La restauración monumental con técnicas tradicionales: desde Viollet Le Duc a Camillo Boito

ciudad y talladas hasta alcanzar un tamaño específico, ladrillo cerámico (en menor cantidad) y argamasa de cal y arena como aglutinante. Los materiales que conforman cada uno de los componentes de la muralla son los siguientes:

- **Muro en sillar.** Generalmente es la cara exterior de la muralla o del baluarte, y comúnmente se le denomina escarpa. Está construido con piedra coralina a partir de un módulo base de 50 x 50 x 70 cm, tallado y pegado con argamasa de cal (hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$) y arena.
- **Muro mixto.** Generalmente localizado en el interior del recinto, es conocido como contramuralla y está conformado por piedra coralina, ladrillo militar de 15 x 30 cm.
- **Relleno de plataforma.** Conformado con material arenoso mezclado con residuos.

Este análisis de materiales permite establecer que las cortinas de murallas y baluartes no son elementos compactos y homogéneos, y la diversidad de materiales presenta distintos deterioros y capacidades de carga.

Desde el punto de vista físico, la muralla presenta diversos grados de deterioro generados por causas directas e indirectas, como se expone a continuación.

Causas directas:

- Las acciones que implican un esfuerzo mecánico superior al que el componente o material es capaz de soportar.
- Los agentes atmosféricos que actúan sobre el inmueble, y en especial en sus elementos envolventes: escarpas, contraescarpas y plataformas.
- Los productos químicos y sus reacciones, sea que provengan del ambiente o que sean aportados por organismos vivos o por el uso.

Causas indirectas:

- Errores cometidos en la ejecución de obras, en la elección de materiales y en el uso que se hace del monumento.
- Aquellas relacionadas con el arrastre de elementos, anclajes en la piedra, etc.⁵

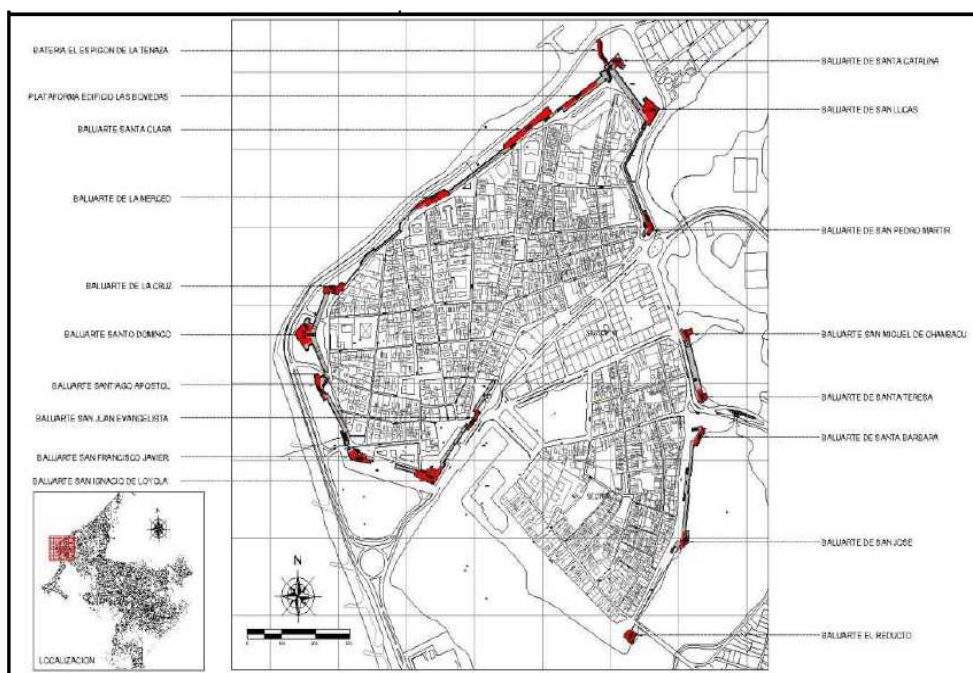


Ilustración 3. Mapa de ubicación de las murallas y señalización de cada componente.

Fuente: (Sociedad de mejoras publicas, 2012).

⁵ Manual de uso temporal y aprovechamiento económico del espacio público de las murallas del Centro Histórico de Cartagena de Indias, bien de interés cultural del ámbito nacional e inscrito en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO. Sociedad de mejoras públicas de Cartagena. <http://www.fortificacionesdecartagena.com/es/manual-uso-murallas.pdf>.



Ilustración 4. Espigón de la Tenazas
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas, 2009)



Ilustración 5. Baluarte San Francisco Javier
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas, 2009)

La Universidad de Cartagena ha aportado varios estudios para este fin. A continuación, se presentaran breves descripciones de estudios y los resultados obtenidos con ello. Igualmente se hará referencia a estudios que han realizado entidades locales y extranjeras.

❖ **Meza Flórez, Mario Alonso y Cohen Rhenals, José David. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales más utilizados y disponibles en la región para la restauración de las fortificaciones coloniales de la ciudad de Cartagena. Universidad de Cartagena, año 2011.**

Este trabajo tuvo la finalidad de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los principales materiales disponibles para restaurar el cordón amurallado en la ciudad de Cartagena, tomando como referencia las principales fuentes que los suministran en el departamento de Bolívar. Para cumplir este objetivo, se recolectó toda la información existente sobre el tema, se contactó con arquitectos que han intervenido estas fortificaciones, se visitaron entidades encargadas de conservar los monumentos de la ciudad y se realizaron ensayos a los materiales hallados (caliza, ladrillo y argamasa) en las distintas fuentes (Turbaco y Bayunca). Las propiedades físicas y mecánicas que se establecieron como fundamentales en dichos materiales fueron: la resistencia a la compresión, desgaste, densidad y porosidad, los ensayos se realizaron teniendo como referencia las normas UNE-EN 1936:1999, UNE-EN 1926:1999 y la I.N.V.E-219.

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

partes de cal por una de arena (2,97 Kg/cm²); además de esto se mostró que existe una relación directa entre la resistencia y el número de días que tenía la muestra.

Dentro de las recomendaciones que surgieron de este proyecto se encuentra la de analizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de las murallas, para luego compararlos con los materiales que están disponibles para su restauración.

❖ **Rhenals Acuña, Lilia Carolina y Santos de Ávila, Luis Eduardo. Trabajo de Grado de Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que constituyen la estructura de las murallas de Cartagena y los utilizados para su restauración y rehabilitación. Universidad de Cartagena. Año 2012.**

Su investigación se basó en determinar los materiales óptimos para las labores de restauración y rehabilitación de las murallas de Cartagena, a través de la comparación entre los materiales originales usados en su construcción y los disponibles en las canteras cercanas a la ciudad con el fin de garantizar la conservación de las características físicas y mecánicas del monumento.

Entre los resultados que obtuvieron dentro de la investigación se destaca que, el cordón amurallado fue construido en varias etapas, pero no se había contemplado que existieran diferencias tan notables en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas del tramo de muralla objeto de estudio que va desde el Espigón de la Tenaza hasta el Baluarte Santo Domingo. Por esto recomiendan el uso de las rocas de las canteras por sectores, mientras se había pensado en dar una recomendación única.

Al efectuar las comparaciones entre el material rocoso de las canteras El Coloncito y La Constancia en el municipio de Turbaco y el material rocoso del tramo de muralla elegido se observa que en las canteras locales si se cuenta con materiales que poseen propiedades físicas y mecánicas similares a los de las murallas y estos pueden ser utilizados en la obras de restauración y rehabilitación de esta fortificación. Recomendando que se realicen estudios

con el fin de mejorar las técnicas y la elección del material al momento de efectuar restauraciones al sector amurallado de la ciudad de Cartagena siendo de suma importancia dado que esto ayudará a preservarlo y a conservar su valor histórico.

❖ **Estudio Físicoquímico Del Deterioro Del Material Pétreo Estructural Antiguo De Las Murallas De Cartagena De Indias- Colombia, Baluarte De Santiago.** (Buendia & Barboza)

En este trabajo se presentaron datos preliminares de la caracterización físicoquímica del material pétreo constituyente de las murallas de Cartagena (Baluarte de Santiago) y de muestras pétreas de las canteras de Turbaco. Las muestras se analizaron por fluorescencia de rayos x, difracción de rayos x y ensayos de cloruros por potenciómetro. En este trabajo se pudo determinar que las rocas se encuentran como calcita mineral, ya que sus difractogramas coinciden con patrones reportados en las diferentes bases de datos, según su caracterización físicoquímica se obtuvo una disminución de la concentración de calcio del 5% por parte de la roca antigua del monumento, esto debido al ambiente agresivo en que se encuentra, con respecto a la roca extraída de las canteras, además se detectó un aumento del 187.5% Azufre, 75% Silicio y 148.7% cloruros por parte de la roca antigua con relación a las muestras no intemperizadas. Esta investigación arrojó datos de importancia sobre los procesos de deterioro e intemperismo, composición química y mineralógica de rocas que constituyen el monumento y se convierte en una base científica para ser utilizada en procesos de restauración.

Este estudio se basó en una comparación de los materiales de las murallas con materiales disponibles en algunas canteras de Turbaco para evaluar el estado de deterioro del material rocoso de la fortificación con respecto al de las canteras, sin embargo, no se evaluaron las propiedades de los materiales.

- ❖ **Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica.**
Dr. José Antonio Terán Bonilla Arquitecto de la Dirección de Estudios Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México.
(http://www.dibam.cl/dinamicas/DocAdjunto_631.pdf, 2004)

Este trabajo se realiza con el fin de desarrollar consideraciones que deben tenerse en cuenta para fundamentar la Restauración Arquitectónica. Parte de una serie de precisiones conceptuales, contemplando la importancia del patrimonio arquitectónico, del conocimiento tanto de los espacios arquitectónicos como de los materiales y sistemas constructivos, así como de los grados y tipos de intervención en la Restauración. Se hace énfasis en la importancia de la investigación como herramienta principal para dicho conocimiento y efectúan una serie de reflexiones respecto a la elección de los materiales y técnicas a emplearse en la restauración, concluyendo con una propuesta metodológica para la elección de los materiales y técnicas propias de la restauración arquitectónica.

Este proceso se hace teniendo en cuenta las situaciones económicas, sociales, geográficas, la facilidad de acceso del sitio en que se encuentra el inmueble a intervenir, el grado de intervención que se pretende realizar, pues muchas veces, aunque se considere que un material o técnica de restauración es la idónea, no se puede utilizar por la carencia de recursos económicos, presupuestales, mano de obra especializada, por la dificultad de adquisición del producto o herramienta necesarios, ser insegura para el operario o debido a que el edificio a intervenir se encuentra en una zona de difícil acceso.

- ❖ **PROPUESTA DE INTERVENCIÓN DE LAS EDIFICACIONES PATRIMONIALES DE LA CIUDAD DE MATANZAS, Leisdy Falcón Rodríguez UNIVERSIDAD DE ORIENTE Facultad de Construcciones.**
(http://universidadypatrimonio.net/doc/doc/2_1_10.pdf, 2010.)

En este trabajo se realiza un estudio de las edificaciones de la ciudad de Matanzas que se encuentra ubicada en la parte centro occidental de la Isla de Cuba, cuenta con un patrimonio construido de grandes valores arquitectónicos, históricos y culturales, donde se propone la

utilización de una metodología que consiste en realizar una inspección a la edificación determinando las características fundamentales y las de su entorno, además se trazan las estrategias para realizar el diagnóstico para la rehabilitación de estas edificaciones patrimoniales de la ciudad; con el objetivo de frenar y corregir el deterioro del patrimonio construido, el cual puede ser generado por falta de mantenimiento, intervenciones erradas, utilización de materiales incompatibles, envejecimiento de la edificación, usos inadecuados de inmuebles, entre otros.

Para realizar el proyecto de rehabilitación de una edificación, se elaboró primeramente, un diagnóstico previo, que permita conocer las causas que originaron el proceso patológico, su evolución, los mecanismos de actuaciones y los posibles tratamientos.

El diagnóstico en las edificaciones es fundamental para cualquier intervención constructiva que se desee realizar, ya sea de conservación o rehabilitación. Algunas limitaciones encontradas fueron inversiones de tiempos en el diagnóstico, ya que si no se genera el correcto deben empezar uno nuevo, no presentan métodos claros para la rehabilitación de las edificaciones, Adicional a esto, por la evolución que tuvo la ciudad en la construcción de estos inmuebles se debe verificar que materiales han sido usados en cada una de sus etapas. Dependiendo de los resultados del diagnóstico o estudio que se le haga a la edificación se determina si se puede recuperar o si se destruye, y con esto no se estaría cumpliendo el objetivo de preservar el patrimonio histórico.

❖ **Current Methods And Future Trends In Testing, Durability Analyses And Provenance Studies Of Natural Stones Used In Historical Monuments.** (Torok & Prikryl, 2010)

Esta investigación resumió las técnicas disponibles para desarrollar ensayos, en el sitio y en el laboratorio, de las piedras naturales utilizadas en monumentos históricos mediante la combinación de los resultados de estudios previos. Utilizaron estudios de diagnóstico no destructivos a bajo-destructivos en el sitio de prueba para comprender el comportamiento de las piedras en condiciones ambientales. Enfatizaron el uso adecuado de las fuentes de datos y

los resultados de las pruebas en la evaluación del comportamiento a largo plazo de las piedras.

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.

La necesidad para realizar este estudio fue debido a los requerimientos de la restauración sostenible y la determinación de la intervención necesaria a los monumentos de piedra naturales. En otras palabras, fue necesario generar información clara para quienes toman las decisiones, para juzgar la velocidad y el tipo de intervenciones. Desde el concepto de la restauración lo mejor sería la salvaguardar las piedras históricas, pero hay casos, cuando la preservación de la construcción requiere el uso de nuevos materiales y piedras de repuesto. Con el principio de la conservación de la piedra original en muchos casos las intervenciones estales como la limpieza y la consolidación es necesaria. Estos métodos pueden prolongar la vida útil de una estructura, pero su uso es a menudo ambiguo.

Mencionan que es muy difícil predecir el futuro de los estudios de las rocas en monumentos, pero que las técnicas que han sido desarrolladas en otros campos como en la medicina o tecnología espacial serán importantes herramientas que se usaran diariamente para los diagnósticos de los monumentos en el futuro.

3.2. MARCO TEORICO

3.2.1. CARTAGENA, PATRIMONIO HISTORICO Y CULTURAL DE LA HUMANIDAD

El comité del Patrimonio Mundial de la UNESCO, en la reunión de Buenos Aires en noviembre de 1984, aprobó la solicitud del Gobierno de Colombia para la inclusión del "Puerto, Fortaleza y Conjunto Monumental de Cartagena de Indias" en la lista del Patrimonio Mundial. Dicha distinción se oficializó el 17 de agosto de 1985, cuando el Director General de la UNESCO, Amadou Mahtar M Bow, descubrió la placa conmemorativa en los bajos de la Alcaldía de la Ciudad. (Alcaldía de Cartagena, 2001).

El concepto actual de Patrimonio cultural es el resultado de un proceso unido al desarrollo de la sociedad contemporánea, sus valores y necesidades, la tendencia actual es la de entender el patrimonio cultural en su sentido más amplio, abarcando todos los signos que documenten las actividades y logros de los seres humanos a lo largo del tiempo.

3.2.2. Clasificación y carácter del patrimonio histórico y cultural.

Los bienes de uso público, los parques naturales, las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables.

El patrimonio cultural de la Nación está bajo la protección del Estado. El patrimonio arqueológico y otros bienes culturales que conforman la identidad nacional, pertenecen a la Nación y son inalienables, inembargables e imprescriptibles. La ley establecerá los mecanismos para readquirirlos cuando se encuentren en manos de particulares y reglamentará los derechos especiales que pudieren tener los grupos étnicos asentados en el territorio de riqueza arqueológica.

La recuperación de la memoria, la valoración del patrimonio, no son simples acciones técnicas, son acciones culturales. No son superfluas son indispensables para la construcción de la nueva mirada hacia el futuro. No son acciones genéricas e impersonales. Si no, particulares, fuertemente caracterizadas en cada lugar, impregnadas en el espíritu de su cultura. No se trata de separar los espacios, edificios, objetos y documentos como piezas de museo. Se trata de entenderlos como paisajes culturales, término que revela la nueva visión que integra las memorias fragmentarias en una gran memoria, los elementos individuales en conjunto significativos.

Las ciudades son grandes paisajes culturales del mundo contemporáneo. Unas de ellas guardan invaluable fragmentos del pasado, otras son mutables, transitorias en permanente reconstrucción, una ciudad se construye en el tiempo, es un fenómeno que solo se entiende a cabalidad si se mira su dimensión histórica la cual se manifiesta en múltiples formas especialmente en el carácter. Una buena parte de ese carácter se encuentra en el espacio urbano y en la arquitectura.

Cartagena es en Colombia y en América una ciudad excepcional. Su memoria cultural no solo se basa en la presencia de un pasado heroico y de unas construcciones magnificas. Es una amalgama de costumbres, lenguajes, espacios, imágenes, olores, colores y sabores. La fuerza de su recinto histórico se diluye en la sensualidad de su ambiente. Lo que hoy queda de la memoria, lo que hoy se preserva ha sobrevivido a incontables ataques culturales, tanto o más fuertes que los asaltos de los bucaneros en el pasado.

La protección de la memoria cultural de Cartagena y en particular de su recinto histórico adquiere actualmente el papel de símbolo de lo que en Colombia es y debe ser esa labor con tanta o más dificultades que en otras ciudades, en Cartagena se libra la batalla por demostrar que el presente y el pasado no solo puede convivir sino complementarse, enriquecerse mutuamente.

Por otra parte los Bienes tangibles son los bienes naturales y paisajes urbano-rurales representados por ecosistemas estratégicos y los perfiles urbanos históricos, los bienes muebles e inmuebles, representados por las edificaciones, ruinas arqueológicas subyacentes

bajo tierra o en el mar y los muebles de valor patrimonial por sus consideraciones históricas, estéticas y de autenticidad.

3.2.3. Fortificaciones.

Está constituido en primera instancia por el legado del período colonial de nuestra historia conformado por las murallas, fuertes y baluartes de los sectores del Centro, San Diego y Getsemaní y por las fortificaciones que defendían las entradas por tierra y mar de la ciudad, que por su condición de puerto estratégico estuvo continuamente asediada por piratas y enemigos de la corona Española, la cual se vio obligada a convertirla en puerto y plaza fuerte. (Alcaldía de Cartagena, 2001).

Este patrimonio cultural del período colonial está constituido, no solo por las estructuras que están visibles, sino además por aquellas que subyacen bajo tierra y agua tales como vestigios de revellines, baterías, túneles de comunicación y escolleras, de los cuales se tiene conocimiento, así como también de los centros de producción que abastecían de materiales y elementos a la construcción de las fortificaciones, tales como canteras, hornos, tejares, represas, haciendas, estancias, etc., que se han venido descubriendo mediante recientes trabajos de investigación.

En segunda instancia forman parte también del Patrimonio de la ciudad los aportes del periodo republicano, tales como las transformaciones efectuadas en el recinto amurallado desde finales del siglo XIX hasta los años treinta del presente siglo, entre los cuales cabe destacar la Torre del Reloj en la Boca del Puente.

3.3. 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 Lezo, 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 de Indias 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 marisca 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)

La construcción fue realizada por etapas.

- 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 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.
- 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 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.⁶

⁶Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena(1984) revista Semana, 2012.<http://www.semana.com/especiales/patrimonios-colombia-humanidad/cartagena-de-indias.html>



Ilustración 6. Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena
Fuente: (Semana.com, 2012)

3.4.EVOLUCIÓN DE LAS NORMAS PROTECTORAS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO DE CARTAGENA.

3.4.1. Normas nacionales.

La preocupación por defender el patrimonio histórico arquitectónico que para el país representa Cartagena, viene de hace más de un siglo, cuando se alzaron voces de protesta por el derribo de sectores de murallas en momentos en que no existía Ley Nacional o reglamento que le diera protección y tales demoliciones eran vistas como señal de progreso. Existía una incipiente conciencia local que valoraba las fortificaciones, más no las casas, en su mayoría, desocupadas y ruinosas por la crisis en que se encontraba sumida la ciudad.⁷

En los albores de este siglo carece en el país la conciencia respecto a los monumentos ligados a nuestras gestas emancipadoras, y en el año de 1918 el Congreso de la República emite la Ley 48 declarando material de la historia a los monumentos y fortalezas de la ciudad, preceptuando que no podrían ser destruidos, reparados ni decorados sin autorización de la Dirección de Bellas Artes y de la Academia de la Historia.

⁷ Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias, Decreto 0977 de 2001. 2001.

En busca de precisar y fortalecer lo dispuesto en la Ley 48, por medio de la Ley 32 de 1924 se crea la Sociedad de Mejoras Públicas para velar por la conservación de los monumentos históricos de la ciudad, y se prohíbe demoler murallas, castillos y demás fuertes. Pese a ello, fue en ese tiempo cuando Cartagena sufrió las mayores demoliciones de sus murallas, hechos que hoy lamentamos.

Este mismo criterio de protección a las murallas y de libertad para intervenir en las construcciones persistió hasta llegar al año 1940, cuando mediante la Ley 5 se declaró Monumento Nacional al sector antiguo de la ciudad dentro del perímetro amurallado, asignando su cuidado a la Academia de la Historia.

El mandato señalado en la Ley se acogió, y la academia de historia ejerció el control, pero con bases muy endebladas, puesto que no existía reglamentación precisa, conciencia ciudadana sobre preservación, ni personal calificado para tan delicado trabajo. El resultado: las obras realizadas fueron una conservación formal de fachadas con copia de elementos coloniales. Durante este periodo se dan demoliciones, transformaciones substanciales con edificaciones que rompen la escala, la armonía del conjunto y el perfil de la ciudad.

Así se continúa hasta el año 1959, cuando el Congreso de la República expide la Ley 163, que integra la legislación existente y se constituye desde entonces hasta nuestros días como el estatuto básico del patrimonio cultural de la nación. En ella se declaran patrimonio histórico y artístico nacional, los monumentos, tumbas prehispánicas, y además de los inmuebles coloniales y aquellos que estén vinculados a las luchas por la Independencia y con el período inicial de la organización de la República. De manera expresa se declara monumento nacional al sector antiguo de Cartagena. Como organismo de control, se integra al Consejo Nacional de Monumentos. Esta Ley fue reglamentada mediante el Decreto Nacional 264 de 1963, que puntualiza y amplía algunos de los criterios contenidos en dicha norma.

Hasta este momento, Cartagena carece de un reglamento específico para la zona histórica, y la aparición en escena del Consejo de Monumentos Nacionales aporta poco, ya que por tener sede en la capital del país, era casi nada lo que podría hacer por esta alejada provincia.

3.4.2. Normas locales, estudios y reglamentaciones específicas.

En el plano local, la carencia de reglamentaciones específicas perduró hasta bien entrado el presente siglo, pero hubo desde mediados del mismo preocupación por la defensa del patrimonio histórico; prueba de lo anterior es lo preceptuado en el Plan Regulador de Cartagena de 1948, en el que se trata la conservación del sector histórico pero se permiten las modificaciones de las casas coloniales y su adaptación al uso comercial. Del mismo modo, el Decreto 219 de 1958 y el Acuerdo 43 de 1963 permiten las construcciones nuevas, siempre que en sus partes externas se cuiden las líneas arquitectónicas del estilo colonial, y estipulan que preferentemente debe usarse el blanco en los muros.

Estas primeras normas locales resaltan por su falta de precisión en los criterios, la búsqueda de una unidad estilística, la supervaloración de lo colonial y el tratamiento puntual de los tópicos. Consolida el fachadismo colonial y descuida la calidad habitacional la inserción en el conjunto. El Plan Piloto de Cartagena (Acuerdo 21 de 1965) enmarca sus criterios bajo los mismos postulados estilísticos coloniales, sin formular de manera específica una reglamentación de la zona histórica.

En el año de 1968 se produce un hecho que cambia lo sucedido hasta entonces: el Centro de Investigaciones estéticas de la Universidad de los Andes (CIE) realiza un trabajo que divide en dos la historia de las reglamentaciones. Por primera vez se hizo un estudio detallado con inventario de las edificaciones, reglamentación particular de los predios, normas precisas para las intervenciones y recomendaciones sobre un gran número de inmuebles, organismos para el control e incentivos para estimular las restauraciones.

Sus fundamentos estructurales eran la valoración de las edificaciones por niveles de importancia, según su antigüedad y valor arquitectónico y la conservación de la imagen general del conjunto urbano. Tenía aspectos cuestionables en su concepción, vacíos y criterios subjetivos que fueron expresados acomodaticamente, pero su impacto general fue positivo y decisorio en la conciencia de restauración.

En la misma época, en 1969, el restaurador español Juan Manuel Zapatero realizó el estudio Las Fortificaciones de Cartagena de Indias, donde planteó, también por primera vez en el

país, los criterios para la conservación y restauración de las fortalezas, con marcada tendencia a la restauración museográfica. Sus estudios no fueron aplicados inmediatamente. Se adoptaron como norma legal en 1978, cuando la Alcaldía de Cartagena expide el Plan de Desarrollo (Fadul, 2001),

Desde entonces fueron utilizadas las fichas reglamentarias, y en control del centro histórico era ejercido por la oficina de Planeación Municipal, que exigía aprobación previa del Centro Filial de Bolívar del Consejo de Monumentos Nacional, creado a partir de ese año, donde tenían asiento instituciones y representaciones gremiales de la ciudad. Sin embargo, la aplicación irregular de las políticas y la manipulación de las normas, hizo que prosperaran restauraciones movidas más hacia el beneficio económico que al rescate patrimonial.

Hoy día, existen normas para regular las restauraciones de casas coloniales como lo concerniente al Decreto POT 0977 parte octava, la ley de Cultura y la ley de Distrito 708, con criterios a tener en cuenta tales como:

3.4.3. Criterios para la conservación.

Constituye una disciplina que reclama la colaboración con todas las ciencias y con todas las técnicas que puedan contribuir al estudio y a la protección del Patrimonio Monumental. Conscientes de que la conservación de los monumentos se beneficia siempre con la dedicación de estos a una función útil a la sociedad, se propuso un plan racional de nuevos usos que además de mantener en vigencia el sistema defensivo abaluartado de la ciudad, le garantizara una supervivencia digna para las futuras generaciones. Toda intervención se hará con el debido respeto por las partes originales del monumento, destacando de la composición arquitectónica todo complemento indispensable y garantizando que todas las propuestas de habilitación sean de carácter reversible. La restauración deberá hacerse con base en estudios arqueológicos e históricos del monumento.

3.4.4. Criterios técnicos de intervención.

Las propuestas de rehabilitación Deben estar avaladas por conceptos técnicos en diversos campos que garanticen lo factible de su ejecución. Deberán resolverse problemas de orden constructivo en materia de restauración, estructural, de ingeniería hidráulica-sanitaria, especialmente por el manejo de los drenajes indispensables para restituir los niveles originales de los glacis recuperando la verdadera proporción de la muralla, luminotécnicos y de vialidad.

3.5. CONSIDERACIONES PARA LA RESTAURACIÓN DE PATRIMONIOS HISTÓRICOS

Principios teóricos.

Las restauraciones que se realizan en un monumento histórico deben cumplir con principios básicos.⁸

- 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

⁸ Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. Terán, José. Artículo revista Conserva año 2004.

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.”

3.5.1. 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.

3.5.2. Tipos de intervención.

Su profundidad y alcance varían dependiendo del grado de intervención que se efectúe en cada edificio histórico.⁹

- **Liberación:** Es la intervención que tiene por objeto eliminar (materiales y elementos) adiciones, agregados y material que no corresponde al bien inmueble original así como la supresión de elementos agregados sin valor cultural o natural que [dañen, alteren, al bien cultural] afecten la conservación o impidan el conocimiento del objeto”. Dichos agregados no son originales ni tienen un valor correspondiente a la historicidad del conjunto. En las tareas de liberación se incluyen la remoción de escombros, la limpieza, la eliminación de humedades, sales, flora, fauna y/o de agregados debidos a causas humanas, así como, cuando sea necesario, la eliminación de intervenciones anteriores.
- **Consolidación:** Tiene por objeto detener las alteraciones en proceso. Como el término mismo lo indica, da solidez a un elemento que la ha perdido o la está perdiendo. En este sentido la consolidación implica cualquier acción que se realice para dar solidez a los elementos de un edificio; en algunos casos un apuntalamiento o

⁹ Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. Terán, José. Artículo revista Coserva año 2004.

la colocación de un resane en un muro pueden ser considerados como procesos de consolidación, pues su finalidad es detener el deterioro de sus elementos o materiales. La consolidación implica también la aplicación de materiales adhesivos, cementantes o de soporte en el bien inmueble con el fin de asegurar su integridad estructural y su permanencia en el tiempo.

- **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.

3.6.MARCO CONCEPTUAL

3.6.1. DEFINICIONES

A continuación se explican los siguientes términos técnicos para facilitar la comprensión de la investigación.

- **Material Pétreo:** Es aquel material proveniente de la roca, piedra o peñasco; regularmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, esto principalmente en la naturaleza.

- **Clasificación**

Dentro de la clasificación de los materiales pétreos podemos encontrar 3 tipos:

- ✓ **Naturales** Localizados en yacimientos naturales, para utilizarlos sólo es necesario que sean seleccionados, refinados y clasificados por tamaños. Comúnmente se hallan en yacimientos, canteras y/o graveras.
 - ✓ **Artificiales** Se localizan en macizos rocosos, para obtenerlos se emplean procedimientos de voladura con explosivos, posteriormente se limpian, machacan y clasifican y con ello se procede a utilizarlos.
 - ✓ **Industriales** Son aquellos que han pasado por diferentes procesos de fabricación, tal como productos de desecho, materiales calcinados, procedentes de demoliciones o algunos que ya han sido manufacturados y mejorados por el hombre.¹⁰
-
- **Aljibe:** es un depósito destinado a guardar agua potable, procedente de la lluvia recogida de los tejados de las casas o de la acogidas, habitualmente, que se conduce mediante canalizaciones. Normalmente es subterráneo, total o parcialmente. No se debe confundir con tinaja: depósito destinado a transportar líquidos. Suele estar construido con ladrillos unidos con argamasa. Las paredes internas suelen estar recubiertas de una mezcla de cal, arena, óxido de hierro, arcilla roja y resina de lentisco, para impedir filtraciones y la putrefacción del agua que contiene.

¹⁰http://es.wikipedia.org/wiki/Materiales_p%C3%A9treos



Ilustración 7. Aljibes.

Fuente: (El blog de la liga Marval, 2001).

- Baluartes:** Es la parte principal de una fortaleza, porque de su disposición, figura, magnitud y construcción, depende la buena defensa de la plaza. El baluarte está conformado por las caras, los flancos, ángulos, gola y semigolas. El baluarte puede ser de varios tipos tales como: lleno, vacío, unido, separado, doble, cortado y plano. Si el terraplén ocupa todo el espacio comprendido de caras, flancos y semigolas, se tiene el baluarte lleno; el baluarte vacío es cuando sigue solamente la dirección de flancos y semigolas; el baluarte unido es aquel que tiene sus flancos y semigolas unidos a las cortinas, a distinción del separado, que algunos quieren apartar del cuerpo de la plaza por un pequeño foso intermedio; el baluarte doble es el que incluye a otro de menor extensión; el baluarte cortado es el que tiene cortaduras hechas con prevención para detener al enemigo y por último el baluarte plano es aquel cuyas semigolas forman una línea recta.



Ilustración 8. Baluarte San Lucas.

Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012).

- **Batería:** Es conjunto de piezas dispuestas para operar conjuntamente. En la artillería de campaña, la batería está formada por cuatro o seis piezas, en la artillería de costa por dos, tres piezas de calibres grandes (305 mm) o cuatro en calibres más pequeños (152,4 mm) y en la artillería antiaérea por cuatro u ocho piezas, aunque hay excepciones.

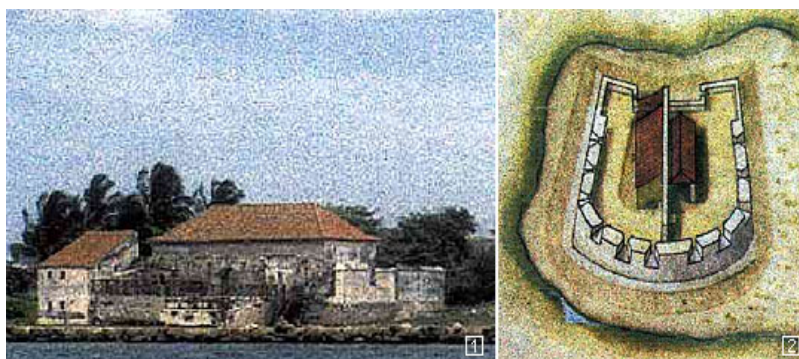


Ilustración 9. Batería de San Juan de Manzanillo.
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012)

- **Castillo:** según definición del Diccionario de la RAE, un «*lugar fuerte, cercado de murallas, baluartes, fosos y otras fortificaciones*». Existe toda una serie de edificaciones militares que guardan analogías con el castillo, como el alcázar, la torre, el torreón, la atalaya, el fuerte, el palacio fortificado, la ciudadela o la alcazaba, lo que hace que no siempre sea fácil asegurar si se trata o no de un castillo propiamente dicho.



Ilustración 10. Castillo San Fernando de Bocachica.
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012).

- **Contraescarpa:** Pared en talud del foso del lado contrario a la fortificación, o sea, del lado de la escarpa.



Ilustración 11. Contraescarpa.
Fuente: (Orden del Temple, 2009)

- **Contra guardia:** Obra de las fortificaciones permanente llamada también cubrecaras, porque definitivamente cubre o tapa las caras el baluarte, que son rectas que forman su ángulo saliente.

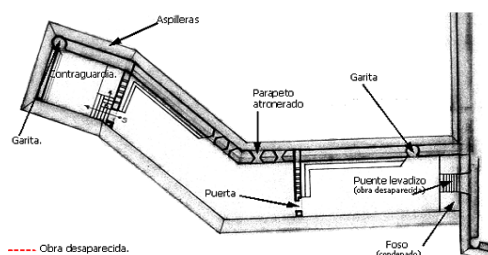


Ilustración 12. Contra guardia.
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012).

- **Contramuralla:** Parte de la obra del cuerpo perfecto de una cortina, la que da al interior del fuerte, castillo o recinto fortificado, cubre el terraplén y tiene que estar revestida.



Ilustración 13. Contramuralla.
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012)

- **Cortina:** Parte recta, escarpada y extensa entre dos baluartes, recubre el terraplén y es propia de las fortificaciones abaluartadas.



Ilustración 14. Cortina San Juan Evangelista/ San Ignacio.
Fuente: (Sociedad de mejoras publicas de Cartagena., 2012)

- **Edificio Militar:** En estos se comprenden: el alojamiento para el estado mayor, cuarteles, pabellones, hospitales para la tropa, etc.



Ilustración 15. Edificio militar.
Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014).

- **Garita:** Es una pequeña torre con troneras o saeteras, generalmente levantada en el ángulo más saliente del baluarte de una fortaleza, que sirve de abrigo y protección a los centinelas que resguardan el recinto.



Ilustración 16. Garita
Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014)

- **Medialuna:** es una proyección hacia el exterior de la muralla en forma de V situado sobre el ángulo del baluarte.



Ilustración 17. Media Luna.

Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014)

- **Muralla:** Obra que está coronada por un paramento, diseñada para defensa, que encierra una plaza.



Ilustración 18. Murallas de la Marina.

Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014)

- **Plataforma:** es una batería ordinariamente de figura rectangular o de trapecio que en las grandes cortinas o en ángulos entrantes de los recintos irregulares suple por el baluarte plano, cuando para estos no hay capacidad o se puede minorar el gasto por la situación naturalmente fuerte.



Ilustración 19. Plataforma de Ballestas.

Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014)

- **Tenaza:** es la obra exterior que presenta a la campaña, un frente compuesto de dos caras que forman un ángulo entrante. Sus lados se llaman alas y sacan su defensa del cuerpo de la plaza, suele situarse delante de la cortina y sobre un baluarte.



Ilustración 20. Tenazas.

Fuente: (Escuela Taller Cartagena de Indias., 2014)

3.6.2. MATERIALES QUE COMPONEN LAS MURALLAS

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

La Caliza¹¹: 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 (píroxenos, anfíboles o plagioclasa) que, junto al anhídrido carbónico de la atmósfera, de lugar a la reacción siguiente que depende de la presión y temperatura:

¹¹Región de Murcia digital. Caliza [Artículo de Internet] <http://www.regmurcia.com> [Consulta:29 Agosto de 2011]



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 un área de 58 Km².



Ilustración 21. 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 época republicana hasta principios del siglo XX en que nuevamente se continuó su explotación. Hoy, cuando ya su principal fuente caliza ha sido agotada, se utiliza para la extracción de zahorra.

La cal¹²: 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.

¹² La cal, tipos y proceso de obtención [Artículo de Internet] <http://www.eindustria.com> [Consulta 30 Agosto 2011]

- 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 (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

Ladrillos de arcilla¹³: Bloque de arcilla o cerámica cocida empleado en la construcción y para revestimientos decorativos. Los ladrillos pueden secarse al sol, pero acostumbran a secarse en hornos. Resisten la humedad y el calor y pueden durar en algunos casos más que la piedra. Su color varía dependiendo de las arcillas empleadas y sus proporciones cambian de acuerdo a las tradiciones arquitectónicas.

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

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

El ladrillo industrial, fabricado en cantidades, sigue siendo un material de construcción versátil.

¹³Arcillas de Colombia. Historia del Ladrillo [Artículo de Internet] <http://www.arcillasdecolombia.com> [Consulta: 30 Agosto de 2011]

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.

3.7.PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

3.7.1. Densidad.

Es una propiedad elemental y fundamental de los materiales, relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la porosidad existente entre ellos. La densidad (ρ) se define como la masa (M) por unidad de volumen (V), y se expresa en Kg/m³.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

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" (para un determinado contenido en humedad) o la "densidad de la roca corregida" (cuando en el volumen de roca no se incluyen los poros abiertos), parámetros obtenidos en algunos ensayos.

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:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

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.

Experimentalmente puede obtenerse mediante el método clásico del picnómetro, en este caso su correcta determinación requiere una buena pulverización y ausencia de humedad en la muestra, y que la temperatura se mantenga constante a lo largo del ensayo. Otra técnica utilizada es el picnómetro de helio, ya que dicho gas –inerte y de número atómico muy bajo– se difunde por todo el espacio vacío, permitiendo obtener el volumen del sólido; dicho volumen se determina a partir del descenso relativo de presión que experimenta el gas contenido en una célula, en la que eventualmente se introduce la muestra.

Dado el porcentaje de cada uno de los minerales que forman la roca (c_i) y su correspondiente densidad (ρ_i), la densidad de los granos minerales (ρ_s) se obtiene como:

$$\rho_s = \frac{\sum c_i * \rho_i}{100}$$

Tabla 1. Densidades de los principales granos minerales formadores de roca

MINERAL	DENSIDAD (g/cm³)
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

Fuente: (Ciencia del suelo, 2007).

- ***Método del picnómetro.***

Dada la masa de una muestra de roca pulverizada y seca (M_o), la masa del picnómetro lleno de agua destilada (P_o) y la masa del picnómetro con la muestra dentro y lleno de agua destilada (P_m), así como la densidad del agua destilada (ρ_{agua}) a la temperatura del ensayo, la densidad de los granos minerales (ρ_s) se obtiene a partir de la expresión:

$$\rho_s = \frac{M_o * \rho_{\text{agua}}}{P_o + M_o - P_m}$$

La densidad de la roca seca (ρ_d), conocida también como densidad de la roca en bloque, densidad aparente o peso del volumen, se define como la masa del material seco (M_s) por unidad de volumen total de roca (V_t), es decir, el volumen incluyendo su parte sólida (V_s) y todos sus espacios vacíos (V_v):

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

La obtención de la masa de la muestra no presenta problema –únicamente es necesario que esté seca–, por lo que los distintos métodos se diferencian en el procedimiento seguido para determinar el volumen. Un método relativamente sencillo –que puede aplicarse a materiales coherentes como las piedras de construcción – consiste en preparar muestras con formas geométricas (prismas, cilindros), y a partir de la medida precisa de sus dimensiones (con un calibre) se calcula el volumen.

También es muy adecuado para este tipo de materiales el método de la pesada hidrostática, basado en el principio de Arquímedes para que el resultado del ensayo sea correcto debe garantizarse una buena saturación de las muestras. Otro método que puede aplicarse a rocas sin grandes poros, es por desplazamiento de mercurio, en este caso se introduce la muestra en una probeta con mercurio y su ascenso de nivel mide el volumen; como el mercurio es un líquido que no moja, no penetra en los poros y el volumen determinado es el total; se trata de un método más rápido y menos preciso.

- ***Método de la pesada hidrostática***

Permite obtener diferentes propiedades físicas a partir de la masa de una muestra de roca obtenida en diferentes condiciones: seca (M_o), saturada en agua (M_s) y sumergida en agua o hidrostática (M_h); entonces se tiene:

Densidad de la roca seca: $\rho_d = [M_o / (M_s - M_h)] \times \rho_{\text{agua}}$

Porosidad abierta (al agua): $n_o = [(M_s - M_o) / (M_s - M_h)] \times 100$

Ccontenido en agua en saturación: $w_s = [(M_s - M_o) / M_o] \times 100$

Normalmente los distintos minerales que forman las rocas –en particular las rocas industriales– muestran diferencias de densidad pequeñas, en consecuencia la “densidad de los granos minerales” es parecida entre ellas, y la “densidad de la roca seca” depende fundamentalmente de la porosidad que posean. Los valores de las otras densidades previamente indicadas están comprendidos entre esos dos, siendo el valor máximo la "densidad de los granos minerales" y el mínimo la "densidad de la roca seca". Esta última densidad es la que presenta mayor interés en el campo de los materiales de construcción. (Rodríguez, 2006)

3.7.2. 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.

$$n = \frac{\text{Volumen de espacios para almacenar fluidos}}{\text{Volumen total}}$$

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.

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: la disolución, las fracturas y la dolomitización.

- a. **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.
 - b. **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.
 - c. **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:
 - a. **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:

$$n_t = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \times 100$$

Tabla 2. Clases de porosidad

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 %

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

- b. **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.
- c. 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.

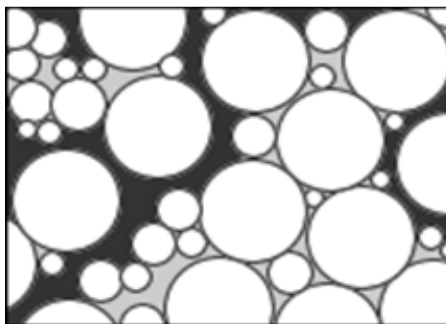


Ilustración 22. Distribución de poros en la roca
Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

- **Geometría y distribución del tamaño de los granos.** Dependiendo del ambiente depositacional en el cual se originó la roca, los granos que la conforman presentarán una determinada distribución en su tamaño. Esta variación en el tamaño de los granos se conoce como escogimiento y es un factor que afecta la porosidad de la roca.

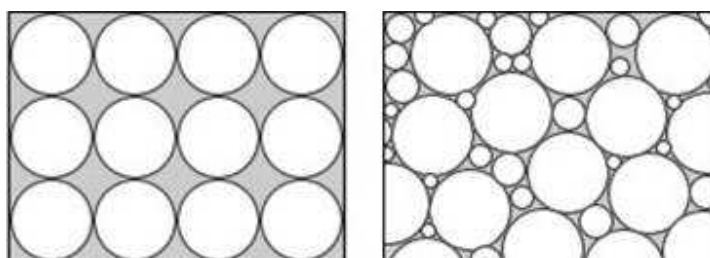


Ilustración 23. Distribución de los granos
Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

Cuando la distribución del tamaño de los granos de una roca es homogénea (buen escogimiento), la porosidad de la roca es alta. A medida que aumenta la heterogeneidad en el tamaño de los granos, la porosidad de la roca disminuye. La forma de los granos también afecta la porosidad de la roca. Un sistema compuesto por granos perfectamente redondeados presentará una porosidad mayor que un sistema formado por granos alargado.

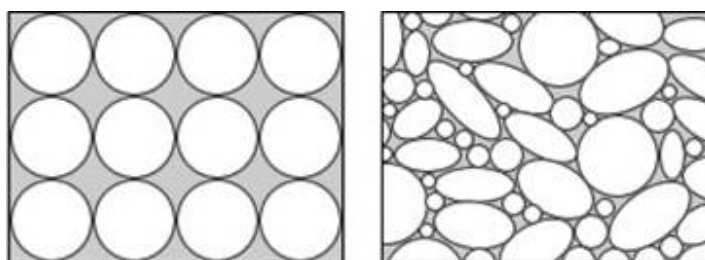


Ilustración 24. Variación en la forma de los granos
Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

- **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).

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

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

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

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

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

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

3.7.3. Resistencia a la abrasión (Desgaste).

Es una propiedad que depende, principalmente, de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros.

Para determinar la dureza se utiliza un método indirecto cuyo procedimiento se encuentra descrito en la Norma INV E-219 (INVIAS, 2007) para los agregados gruesos. Dicho método más conocido como el de la Máquina de los Ángeles, consiste básicamente en colocar una cantidad especificada de agregado dentro de un tambor cilíndrico de acero que está montado horizontalmente. Se añade una carga de bolas de acero y se le aplica un número determinado de revoluciones. El choque entre el agregado y las bolas da por resultado la abrasión y los efectos se miden por la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material desgastado expresándolo como porcentaje inicial.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{[P_a - P_b]}{P_a}$$

Dónde:

P_a es la masa de la muestra seca antes del ensayo (grs)

P_b es la masa de la muestra seca después del ensayo, lavada sobre el tamiz 1.68 mm.

En el ensayo de resistencia a la abrasión o al desgaste se utiliza la Máquina de los Ángeles. Esta es un aparato constituido por un tambor cilíndrico hueco de acero de 500 mm de longitud y 700 mm de diámetro aproximadamente, con su eje horizontal fijado a un dispositivo exterior que puede transmitirle un movimiento de rotación alrededor del eje. El tambor tiene una abertura para la introducción del material de ensayo y de la carga abrasiva; dicha abertura está provista de una tapa que debe reunir las siguientes condiciones:

- a. Asegurar un cierre hermético que impida la pérdida del material y del polvo.
- b. Tener la forma de la pared interna del tambor, excepto en el caso de que por la disposición de la pestaña que se menciona más abajo, se tenga certeza de que el material no puede tener contacto con la tapa durante el ensayo.

- c. Tener un dispositivo de sujeción que asegure al mismo tiempo la fijación rígida de la tapa al tambor y su remoción fácil.
- d. El tambor tiene fijada interiormente y a lo largo de una generatriz, una pestaña o saliente de acero que se proyecta radialmente, con un largo de 90 mm aproximadamente. Esta pestaña debe estar montada mediante pernos u otros medios que aseguren su firmeza y rigidez. La posición de la pestaña debe ser tal que la distancia de la misma hasta la abertura, medida sobre la pared del cilindro en dirección de la rotación, no sea menor de 1250 mm. La pestaña debe reemplazarse con un perfil de hierro en ángulo fijado interiormente a la tapa de la boca de entrada, en cuyo caso el sentido de la rotación debe ser tal que la carga sea arrastrada por la cara exterior del ángulo.
- e. Una carga abrasiva consiste en esfera de fundición o de acero de unos 48 mm de diámetro y entre 390 y 445 gramos de masa, cuya cantidad depende del material que se ensaya, tal como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 5. Carga abrasiva según el número de esferas

TIPO	NUMERO DE ESFERAS	MASAS DE LAS ESFERAS
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±25
D	6	2500±15

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

3.7.4. Resistencia a la compresión.

Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir, en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad

arbitraria. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión.

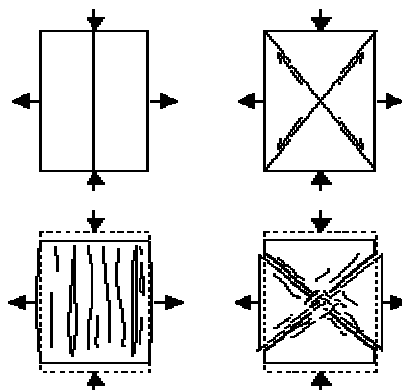


Ilustración 25. Facturación extensional y por cizalla.
Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

Es importante indicar que los resultados obtenidos en los experimentos de resistencia a la compresión para un mismo material dependen de la forma y tamaño de la probeta. Así, los prismas y cilindros largos presentan menores resistencias a la compresión que los cubos con la misma área de sección, y estos a su vez menor que los prismas y cilindros cortos (con alturas menores que sus lados o radios). Igualmente, la resistencia a la compresión depende de la tasa de aplicación de la carga, de forma que a mayores velocidades de compresión mayor es el valor de la resistencia.

La resistencia a la compresión de los materiales de construcción es muy variable, oscilando desde materiales:

Tabla 6. Tipo de material según su resistencia a la compresión

TIPO DE MATERIAL	RESISTENCIA (kg/cm²)
Muy débiles	< 70
Débiles	70 – 200
Moderadamente resistentes	200 – 700
Fuertes	700 – 1400
Muy fuertes	> 1400

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

3.7.5. Dureza.

Es la resistencia de los materiales para resistir la penetración de otro cuerpo. Para el caso de minerales, la dureza se ha considerado clásicamente como la resistencia que presenta un mineral a ser rayado por otro mineral o material. F. Mohs dedujo empíricamente una escala cualitativa basada en las durezas relativas de distintos minerales que ha sido muy utilizada como criterio de clasificación y de determinación. Esta escala es como sigue:

Tabla 7. Escala de dureza de Mohs

DUREZA	MINERAL
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Flúor
5	Apatita
6	Ortoclase
7	Cuarzo
8	Topacio
9	Corindón
10	Diamante

Fuente: (La comunidad petrolera, 2012)

Cada uno de estos minerales es capaz de rayar a los situados antes que él en la escala, y a su vez es rayado por los que vienen después. La medida de la dureza suele ser cualitativa (aunque hay métodos de determinación precisa) estableciéndose en una primera aproximación en base a los siguientes criterios: si la uña raya al mineral la dureza es menor de 2.5; si una navaja raya al mineral la dureza es menor de 5.5; si el mineral raya al vidrio la dureza es igual o mayor de 7. Así, el cuarzo se diferencia de la calcita en que aquel raya al vidrio y ésta no.

Esta propiedad es vectorial, es decir, depende de la dirección en que se aplique en un mineral, debido a la diferente distribución de enlaces cristalinos en las estructuras minerales. Así por ejemplo, la distena (Al_2SiO_5) es un mineral de hábito prismático que presenta una dureza de 4 a lo largo de su elongación mayor y de 6.5 perpendicularmente a la misma. En

general, los minerales presentan durezas más bajas en superficies de exfoliación respecto de otras direcciones. En cualquier caso, la dureza depende del tipo de enlaces atómicos presentes, de la estructura y de la composición. A igualdad de otros factores, los minerales con estructuras más densas son más duros (e.g. el aragonito tiene una dureza de 4 y la calcita de 3), y los que presentan elementos más pequeños son más duros (e.g. el corindón (Al_2O_3) tiene una dureza de 9 y la hematites (Fe_2O_3) de 6, presentando el Al^{+3} un radio iónico de 0.57 \AA y el Fe^{+3} de 0.67 \AA). En general, los minerales que presentan moléculas de (OH) o de agua (H_2O) tienen durezas bajas, lo cual es debido a que en las estructuras hidratadas existen enlaces débiles entre estas moléculas y el resto de los átomos, como en el caso del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y el talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Aplicadas a los materiales pétreos, esta propiedad es importante para evaluar la trabajabilidad, con utensilios de impacto y abrasivos, de los materiales en la cantera y en la obra. Existen muchos métodos de evaluar la dureza: la resistencia al *rayado*, a la *indentación*, a la *abrasión*, al *rebote* y al *impacto*. La gran complejidad de los materiales pétreos no permite una correlación clara entre los distintos parámetros de resistencia mecánica y de dureza, aunque en general, la dureza de los materiales aumenta a medida que la resistencia a la compresión aumenta. Dado que las rocas son materiales frágiles, presenta débil o moderada resistencia al impacto, por lo que son materiales *trabajables* con herramientas de impacto. Esto permite en la mayor parte de los casos un buen acabado. Lo mismo puede decirse de su buena trabajabilidad por pulido, particularmente en rocas como calizas y mármoles, aunque existen rocas relativamente duras (i.e., aquellas que presentan abundante cuarzo, como cuarcitas y granitos) que resisten bien la raya y la abrasión. (Universidad de Granada, 2007).

3.8. Metodologías no destructivas aplicables en obras de rehabilitación de patrimonios

La conservación del patrimonio cultural está considerada como un principio fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas. En los últimos años, se han realizado extensas investigaciones en torno a esta área, conduciendo a desarrollos en la inspección, ensayos no

destruictivos, monitorización y análisis estructural de monumentos. No obstante la comprensión, el análisis y la reparación de construcciones históricas continúa siendo uno de los desafíos más importantes de las técnicas modernas. El análisis de construcciones antiguas formula importantes desafíos porque dada la complejidad de su geometría, la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, las diferentes técnicas de construcción, la ausencia de conocimiento sobre los daños existentes, de cómo afectan determinadas acciones a las construcciones a lo largo de su vida y la falta de códigos. (Lombillo & Villegas, 2005).

Los métodos no destructivos son, de hecho, necesarios para obtener las características mecánicas necesarias para el análisis y comprensión del comportamiento mecánico de las construcciones históricas, así como, para validar el análisis en sí mismo. Estos, están siendo cada vez más empleados en diferentes aplicaciones, especialmente la conservación del patrimonio cultural e histórico. La principal característica de estos métodos es su capacidad de investigar un lugar o estructura sin invadirla. Como es obvio, debería darse preferencia a las técnicas no destructivas minimizando el empleo de las que tienen un carácter destructivo, especialmente cuando los edificios se ven envueltos en alto grado de deterioro, o estén dotados de una estética o una antigüedad que justifica su no alteración.

Clasificación de los métodos de END: Podemos establecer distintas clasificaciones de los métodos de END según sus fundamentos, aplicaciones o su estado actual de desarrollo. (Berganza & Hernández, 2007)

- *Según sus fundamentos:* Se basan esencialmente en las aplicaciones de uno o varios de los siguientes fenómenos físicos: Ondas electromagnéticas, ondas elásticas o acústicas, emisión de partículas subatómicas, otros fenómenos, tales como los de capilaridad, estanqueidad, absorción, etc.
- *Según sus aplicaciones:* Se puede decir que las aplicaciones de los métodos de END permiten realizar estudios de defectos, hacer mediciones y caracterizar materiales.
- *Según el estado actual de desarrollo:* Se pueden clasificar en:

- a. **Métodos convencionales de END:** Consideramos como métodos convencionales aquellos que debido al desarrollo actual de los equipos y técnicas operatorias, permiten seguir el ritmo de la producción, proporcionan un registro permanente y permiten la automatización del proceso de inspección. Los siguientes se pueden considerar como métodos de END convencionales: Radiografía Industrial (RI), ultrasonidos (US), líquidos Penetrantes (LP), partículas Magnetizables (PM), corrientes Inducidas (CI) y Visual (EV)

- b. **Métodos nuevos o no convencionales de END:** Consideramos como métodos nuevos, aquellos de reciente introducción o en período actual de desarrollo, o aquellos que no tienen una utilización generalizada. Los siguientes se pueden considerar como métodos de END no convencionales: Fuga, termografía, espectroscopia ultrasónica, emisión acústica, radiografía neutrónica, tensiones residuales, entre otros.

3.8.1. Métodos ultrasónicos (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.



Ilustración 26. Equipo ultrasónico
Fuente: (Lombillo & Villegas, 2005)

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

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de transformar una corriente eléctrica en oscilaciones mecánicas, de esta forma cuando una carga eléctrica es aplicada sobre las caras polarizadas de este tipo de cristales produce un desplazamiento mecánico que origina una oscilación. Como ejemplos de dichos materiales pueden referirse el cuarzo, el titanato de bario, o el circonato de plomo y titanio.

Un transductor se caracteriza por su frecuencia de transmisión, por la posición del cristal, por su forma (cilíndrica o cónica), por su sensibilidad (capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica acústica) y por su poder resolutivo (capacidad de detectar las señales de dos discontinuidades muy próximas). El material acoplante mejora la transmisión de las oscilaciones producidas por el cristal (ejemplos: vaselina o grasa consistente).

Debido a su corta longitud de onda los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que éstos son muy direccionables. Cuanto mayor es la longitud de onda mayor es la dispersión angular que se produce. 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. A continuación se adjunta una tabla en la que se indican los rangos más habituales de velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas:

Tabla 8. Velocidad de propagación de ultrasonidos en distintos tipos de rocas.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE PROPAGACION (m/s)
Granito	3000 – 5000
Basalto	4500 – 6500
Gabro	4500 – 6500
Arenisca	1400 – 4000
Caliza	2500 – 6000
Mármol	3500 – 6000
Cuarcita	5000 – 6500
Pizarra	3500 – 5500

Fuente: (Lombillo & Villegas, 2005)

3.8.2. Método del esclerómetro o martillo de Schmidt.

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 27. Martillo de Schmidt
Fuente: (PCE instrument, 2013).

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

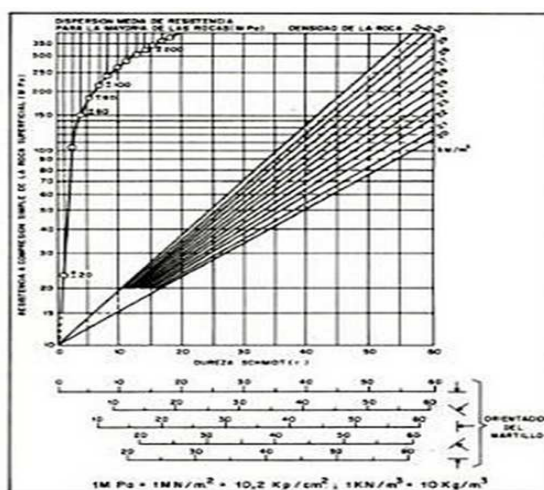


Ilustración 28. Gráfico de correlación entre el resultado del esclerómetro y la resistencia a compresión simple.
Fuente:(Ayala & Andreu, 2006)

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.

La dureza también puede ser determinada mediante el ensayo de escleroscopía mediante el Martillo de Schmidt para el cual se necesitan muestras representativas del material, lo más grande posibles, o bloques cuyo espesor sea como mínimo de 6cm. Se “tara” el martillo usando el yunque patrón suministrado por el fabricante. Se hacen 10 medidas y se calcula la media. Se calcula el factor de corrección.

$$\text{Factor de correccion} = \frac{\text{Valor estandar del yunque patrón}}{\text{media de las 10 medidas}}$$

Las muestras se sujetan firmemente en el soporte y se comprueba que su superficie es lisa y plana y que no hay discontinuidades, cracks, etc por lo menos en los 6 cm superficiales de la muestra. Se realizan al menos 20 medidas por muestra aplicando preferentemente el martillo en posición perpendicular a la superficie de la muestra. Cada nueva medida se hará con una separación mínima equivalente al diámetro de la punta del martillo. Se descarta la mitad de las medidas, concretamente las que den los valores inferiores, y se hace la media de las medidas restantes. La dureza al rebote se calcula multiplicando esta media por el factor de corrección.

4. METODOLOGÍA.

Este trabajo se realizó mediante una investigación de tipo mixto, donde principalmente se buscó determinar las propiedades físicas y mecánicas del material pétreo extraído de las Canteras de la Isla de Tierra Bomba para compararlas con las del material pétreo que constituyen las murallas de Cartagena y así comprobar, cómo lo dice la literatura históricamente, si fue utilizado en la construcción del cordón amurallado.

Asimismo se pretendió comparar las propiedades del material pétreo extraído de la cantera Coloncito en el municipio de Turbaco - Bolívar utilizado en la restauración de las murallas, con el material extraído de la Isla de Tierra Bomba y el que constituye las murallas de Cartagena para determinar si es un material posee características similares y es apropiado para las labores de restauración y rehabilitación de las murallas de Cartagena.

4.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

En primera instancia, se realizó una revisión bibliográfica de los componentes históricos, investigaciones y trabajos que se han efectuado para la identificación y caracterización de los materiales. Se hizo necesaria una inspección visual y registro fotográfico de las murallas con el fin de observar las dimensiones de los bloques, (ver *Ilustración 29*) y espesor de la pega, (ver *Ilustración 30*), los sectores en los que se utilizan ladrillos, entre otros. Paralelo a esto, las visitas a la Sociedad de Mejoras Publicas y a la Escuela Taller Cartagena de Indias, entidades encargadas de la conservación y restauración de los monumentos en la ciudad, fueron muy relevantes para tabular las fuentes de materiales utilizados en los procesos de restauración y su disponibilidad.



Ilustración 30. Aspecto físico de material rocoso de las murallas de Cartagena
Fuente: (Rhenals & Santos, 2012).

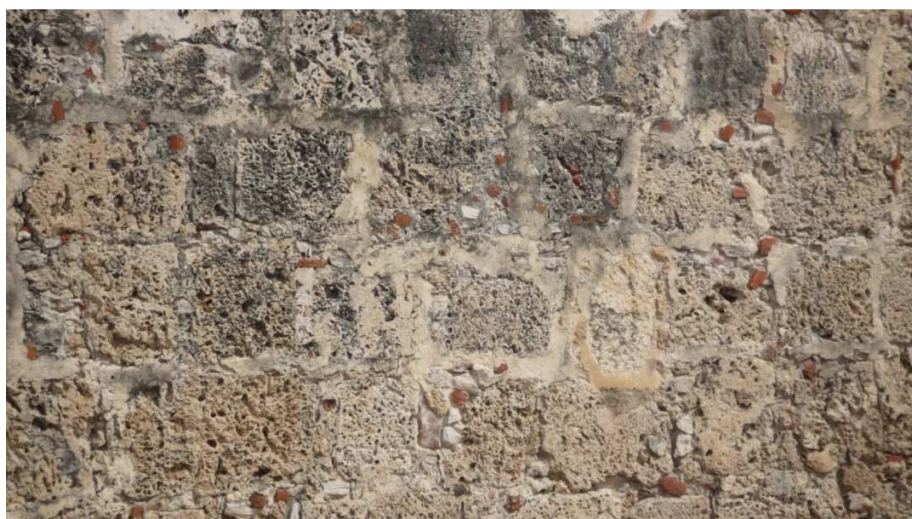


Ilustración 31. Distribución y pega de bloques en las murallas
Fuente: (Rhenals & Santos, 2012).

Para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye el Cordón Amurallado se debió tener en cuenta que, por Ley de la República de Colombia, no se puede extraer material del monumento, así que no se puede tomar, arbitrariamente, este material para efectuar pruebas en laboratorio. Fue conveniente utilizar técnicas de ensayos no destructivos, “in situ”, como pulso ultrasónico y esclerómetro, con el fin de no incumplir las normas y llevar el estudio a cabalidad.

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. 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

Las propiedades físicas y mecánicas del material que fue obtenido en las canteras de la isla de Tierra Bomba, ubicadas en cercanías de la ciudad de Cartagena, fueron analizadas mediante pruebas de laboratorio, para las cuales se utilizó los laboratorios ubicados en las instalaciones de la Universidad de Cartagena. Cada uno de los ensayos fueron efectuados 3 veces para obtener valores promedios.

El material de la cantera Coloncito en Turbaco y de las murallas de Cartagena de indias fueron evaluadas de la investigación previa realizada por egresados de la Universidad de Cartagena titulado “ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MATERIAL ROCOSO QUE CONSTITUYE LA ESTRUCTURA DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA Y EL UTILIZADO PARA SU RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN” (Rhenals& Santos,2012), Se llevó a cabo para determinar propiedades similares entre ellos y concluir si este material se usó para la edificación de las murallas de Cartagena de Indias

A continuación se listan las propiedades físicas y mecánicas objeto de esta investigación y los ensayos que se utilizaron para su determinación:

Tabla 9. Ensayos y propiedades objeto de estudio

PROPIEDAD	ENSAYO O EQUIPO	ENSAYO O EQUIPO
	(MURALLAS)	(CANTERAS)
Densidad	Relaciones con resultados de Esclerómetro o pulso ultrasónico	Picnómetro o pesada hidrostática
Porosidad	Indirectamente usando la densidad	Indirectamente usando la densidad
Resistencia la compresión	Esclerómetro o pulso ultrasónico	Maquina Universal
Desgaste	-	Máquina de los Ángeles

Fuente: Investigadores, 2014.

4.2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Con el material de las murallas y el de las canteras se evaluaron los mismos parámetros, propiedades físicas y mecánicas, para realizar una comparación entre estos. De dicha comparación se estimó cuál de los materiales de las diferentes canteras se ajusta más o posee propiedades similares a las que presenta el material del Cordón Amurallado.

4.3. ENSAYOS DEL MATERIAL ROCOSO OBTENIDO EN LA CANTERA DE LA ISLA DE TIERRA BOMBA PARA CONOCER SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

En primer lugar, se visitó la cantera ubicada a $10^{\circ}37'49''\text{N}$ $75^{\circ}57'45''\text{O}$ en la isla de Tierra Bomba para obtener el material rocoso a ensayar (Ver Ilustración 29a31). Este material fue sometido a ensayos de laboratorio con los cuales se pudieron determinar propiedades físicas y mecánicas como: Densidad (aparente y real), porosidad, Desgaste (mecánico) y Resistencia a la compresión. Estos ensayos se realizaron en los laboratorios de suelo y resistencia de materiales, Barrios Padilla Ingenieros s.a.s.



Ilustración 32. Extracción de material en canteras de Tierra Bomba
Fuente: (Autores, 2014)



Ilustración 33. Extracción de material en cantera de Tierra Bomba
Fuente:(Autores, 2014)



Ilustración 34. Zona de extracción de material
Fuente:(Autores, 2014)

Para realizar favorablemente los ensayos de Densidad y Resistencia a la Compresión de este material se hizo necesario cortar las rocas en pequeños bloques cilíndricos para lo cual se utilizó un extractor de núcleos (Ver Ilustración 32). Las dimensiones de los bloques fueron de 6,35 cm de diámetro y alturas variadas hasta 10 cm



Ilustración 35. Muestras a ensayar
Fuente: (Autores, 2014)

Para el ensayo de **Densidad Real** (ρ_r) fue necesario secar la muestra en el horno durante 24 horas, aproximadamente, luego se procedió a numerar y pesar en una balanza cada una de las probetas para así obtener su peso seco, seguidamente se introdujeron en un recipiente con agua por un día y una vez ya saturadas las probetas, se pesó cada una de ellas bajo agua (con ayuda de una canasta), así se obtuvo el peso sumergido; por último se secaron las muestras con ayuda de un paño y se pesaron nuevamente para obtener el peso saturado. La densidad real se calculó a partir de la fórmula:

$$\rho_r = \frac{M_{sp}}{V_s}$$

Dónde:

M_{sp} = Peso de la muestra seca

V_s = Volumen de la muestra



Ilustración 36. Muestras sumergidas
Fuente: (Autores, 2014)



Ilustración 37. Pesaje de muestras
Fuente: (Autores, 2014)

Para determinar la **Densidad Aparente** (ρ_a) se utilizaron 3 bloques o probetas cilíndricas, se enumeraron y se sumergieron en agua durante un día, teniendo en cuenta que quedaran totalmente cubiertas por la lámina de agua.

Después de esto se secaron superficialmente y se pesaron en una balanza electrónica con el fin de conocer el peso saturado (superficialmente seco). Posteriormente, con ayuda de una canasta sumergida en agua y unida a la balanza, se tomó el peso sumergido de cada una de las muestras

Finalmente, se ingresaron estos bloques al horno a una temperatura de 100 grados centígrados durante, aproximadamente 24 horas para eliminar el contenido de agua en estas y luego se tomó el peso seco de cada muestra. Con todos estos datos se procedió a calcular la densidad aparente que viene dada por:

$$\rho_a = \frac{M_o}{M_s - M_h}$$

Dónde:

M_o = Peso seco

M_s = Peso saturado

M_h = Peso sumergido

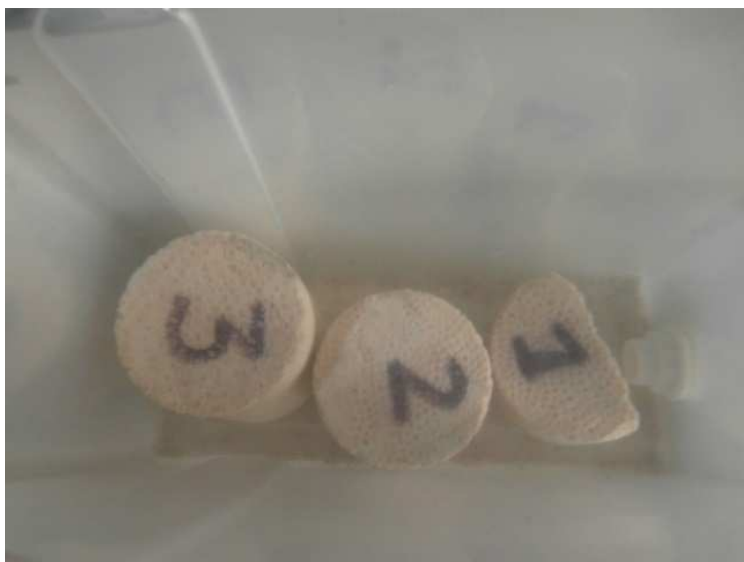


Ilustración 38. Muestras sumergidas
Fuente:(Autores, 2014)



Ilustración 39. Pesaje de muestras
Fuente: (Autores, 2014)

La realización del ensayo de **Desgaste** se efectuó bajo la norma Invías E 219, siguiendo la gradación E (Ver Ilustración 40. **Serie de tamices utilizada y muestra a ensayar**

Fuente: (Autores, 2014).



Ilustración 41. Muestra sacada de la Máquina de los Ángeles

Fuente:(Autores, 2014)



Ilustración 42. Máquina de los Ángeles empleada
Fuente:(Autores, 2014)

Por ser un material gravoso. Inicialmente, se trituró el material y se secó en el horno durante 24 horas, luego se tamizó y se tomaron 2500 gr de material que pasó por el tamiz N° 3” y que se retuvieron en el tamiz N° 2 ½”, 2500 gr de material que pasó por el tamiz N° 2 ½” y que se retuvieron en el tamiz N° 2” y 5000 gr de material que pasó por el tamiz N° 2” y que se retuvieron en el tamiz N° 1 ½”. En total se tomaron 1000 gr de material, este fue introducido en la máquina de los Ángeles junto a las 12 esferas y se hizo girar a una velocidad de 33 rpm hasta completar 1000 revoluciones. Luego de este proceso, se sacó el material, se lavó por el tamiz N° 4 y se colocó en el horno durante 24 horas para que se secase. Finalmente se tomó el peso del material restante. Se realizaron 3 ensayos del material. El porcentaje de desgaste se calculó mediante lo siguiente:

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

Dónde:

P1= Peso inicial

P2 = Peso final



Ilustración 40. Serie de tamices utilizada y muestra a ensayar
Fuente: (Autores, 2014).



Ilustración 41. Muestra sacada de la Maquina de los Ángeles
Fuente:(Autores, 2014)



Ilustración 42. Máquina de los Ángeles empleada
Fuente:(Autores, 2014)

Tabla 10. Gradaciones para ensayo de Desgaste a la abrasión en la máquina de los Ángeles

PASA TAMIZ N°	RETENIDO SOBRE TAMIZ N°	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					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	N° 3			2500				
N° 3	N° 4			2500				
N° 4	N° 8				5000			
N° DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12

Fuente: Norma Invias E 219 de 2009

La **Resistencia a la Compresión** se determinó mediante el ensayo basado en la norma ICONTEC 673 utilizando la Máquina Universal (Ver imagen 40 y 41), se midieron las dimensiones de las probetas a ensayar, se puso en funcionamiento la maquina Universal, se seleccionó la forma geométrica que tenía el material a evaluar (dentro del software de la maquina) y se insertaron las dimensiones de estas, se verifico que estuviera en la posición cero y carga cero, luego se puso en movimiento la máquina y se dio inicio a la evaluación de

esta propiedad. Mientras se realiza el ensayo, el software de la maquina va generando la gráfica de Esfuerzo-Deformación. Cuando ocurre la fractura del material se suspende la prueba y se descarga la máquina para sacar el material fracturado y seguir con las demás pruebas. Se realizaron 3 pruebas con el material.



Ilustración 43. Maquina Universal empleada
Fuente:(Autores, 2014)



Ilustración 44. Muestra al finalizar la prueba
Fuente: (Autores, 2014)

Luego se efectuaron los cálculos respectivos, se compilaron los resultados en tablas y se organizaron de acuerdo a cada una de las propiedades medidas. Posteriormente se realizaron graficas que permiten que la información sea más entendible, manejable y facilite las comparaciones

También se realizó la comparación de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas del material y se determinó que sí se asemeja al material constituyente de las murallas y confirmar la hipótesis de que el material fue extraído para la construcción de parte del cordón amurallado y que el material obtenido de la cantera Coloncito es adecuado para ser utilizado en procesos de restauración, por sus características físicas y mecánicas similares a las del material extraído de Tierrabomba.

5. RESULTADOS

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron resultados a partir de los ensayos realizados a las rocas calizas de la cantera seleccionada y como información secundaria, los resultados del estudio hecho a las murallas y a la cantera Coloncito, esto mediante investigaciones previas realizadas por el grupo Ciencia y sociedad con egresados de la de la Universidad de Cartagena¹⁴. Estos resultados son presentados mediante tablas y graficas que facilitan su comprensión y que se detallan más adelante.

5.1.CANTERAS DETIERRA BOMBA

5.1.1. Densidades y Porosidades

En la Tabla 9 se observan los resultados de Densidad Real que se obtuvieron de las muestras de la cantera de Tierra Bomba, la cual presenta un promedio de 1,58 gr/cm³. Además, en la Tabla 10 se registraron los resultados de Densidad aparente, que junto a los valores de Densidad Real se utilizaron en el cálculo de la Porosidad abierta y la Porosidad total.

Tabla 11. Resultados de Densidad Real en material de la cantera de Tierra Bomba

MUESTRA	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm ³)	PESO SECO (gm)	DENSIDAD REAL (gm/cm ³)
1	6,35	7	221,69	309,4	1,90
2	6,35	8,5	269,19	519,2	2,43
3	6,35	9,5	300,86	569,7	2,39
PROMEDIO	6,35	6,9	263,91	466,1	2,24

Fuente:(Autores, 2014).

¹⁴(Rhenals& Santos, 2012)

Tabla 12. Resultados de Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Total en material de la cantera de Tierra Bomba

MUESTRA	PESO SECO (gr)	PESO SATURADO (gr)	PESO SUMERGIDO (gr)	DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	POROSIDAD ABIERTA (%)	POROSIDAD TOTAL (%)
1	309,4	323	203	1,3	11,24	12,74
2	519,2	542,1	342,1	2,2	12,35	14,55
3	569,7	592,7	342,7	2,8	13,03	16,43
PROMEDIO	346,12	485,93	295,93	2,1	12,21	14,57

Fuente:(Autores, 2014)

De lo anterior se puede afirmar que:

- La Densidad Real, de las rocas de la cantera de Tierra Bomba es 14,57% mayor a su Densidad aparente, lo cual determina el porcentaje de Porosidad que presentan las mismas.
- Este material, según la *Tabla 13*. corresponde a una roca con porosidad media.
- Se verifica que la densidad es inversamente proporcional a la porosidad. Valores de densidad altos dan como resultado porosidades bajas. La porosidad de esta roca es alto, esto se debe a que posee una densidad aparente baja.

5.1.2. Desgaste por Abrasión

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se presentan los resultados de desgaste por abrasión en las muestras de la cantera de Tierra Bomba.

Tabla 14. Resultados de Desgaste por abrasión en material de la cantera Tierra Bomba

MUESTRA	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr)	DESGASTE (%)
1	10000	6630	33,7
2	10000	6632	33,68
3	10000	6629	33,71
PROMEDIO	10000	6630	33,70

Fuente:(Autores, 2014)

De lo anterior se infiere:

- Cuando el porcentaje de desgaste es mayor de 50%, se asume que la roca es de mala calidad, si el desgaste es menor de 20%, es excelente. Sin embargo, el porcentaje de desgaste que presento el material de la cantera Coloncito ubicada en Turbaco se encuentra en el orden del 33,70 % con lo cual se infiere que este material posee una calidad media.
- Este porcentaje de desgaste nos permite saber que si este material es sometido a continuos procesos de abrasión, perdería la tercera parte de su masa, aproximadamente.

5.1.3. Resistencia a la Compresión

En la *Tabla 15*. Se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión efectuados con la maquina Universal.

Tabla 16. Resultados de Resistencia a la Compresión en material de la cantera Tierra Bomba

MUESTRA	DIAMETRO	AREA (cm ²)	RESISTENCIA (PSI)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	CARGA (kg)
4	6,35	31,67	1407,40	98,52	31,2
5	6,35	31,67	1750,23	122,52	38,8
PROMEDIO	6,35	31,67	1578,82	110,52	35

Fuente:(Autores, 2014)

- Al caracterizar el tipo de material según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los valores de resistencia a la compresión obtenidos se llegó a la determinación de que este material es débil.

5.2.CANTERA COLONCITO

5.2.1. Densidades y Porosidades

En la *Tabla 17*. Se observan los resultados de Densidad Real que se obtuvieron de las muestras de la cantera Coloncito, la cual presenta un promedio de $2,60 \text{ gr/cm}^3$. Además, en la *Tabla 18* se registraron los resultados de Densidad aparente, que junto a los valores de Densidad Real se utilizaron en el cálculo de la Porosidad abierta y la Porosidad total.

Tabla 19. Resultados de Densidad Real en material de la cantera Coloncito

MUESTRA	PESO MUESTRA (gr)	VOLUMEN INICIAL (ml)	VOLUMEN FINAL (ml)	VOLUMEN (ml)	DENSIDAD REAL (gr/cm^3)
1	10	70	73,5	3,5	2,86
2	10	70	74	4	2,5
3	10	70	74	4	2,5
4	10	90	93,5	3,5	2,86
5	10	90	94	4	2,5
6	10	90	94	4	2,5
7	10	90	94	4	2,5
8	10	70	73,5	3,5	2,86
9	10	90	94	4	2,5
10	10	110	114	4	2,5
11	10	70	74,5	4,5	2,22
12	10	70	73,5	3,5	2,86
PROMEDIO	10	81,67	85,54	3,88	2,6

Fuente:(Rhenals& Santos, 2012)

Tabla 20. Resultados de Densidad Aparente, Porosidad Abierta y Total en material de la cantera Coloncito

MUESTRA	PESO SECO (gr)	PESO SATURADO (gr)	PESO SUMERGIDO (gr)	DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	DENSIDAD REAL (gr/cm ³)	POROSIDAD ABIERTA (%)	POROSIDAD TOTAL (%)
1	1145,8	1190,6	696,2	2,32	2,6	9,06	10,72
2	1113,4	1152,5	676,2	2,34	2,6	8,21	9,95
3	1160,9	1204,9	702,5	2,31	2,6	8,76	10,99
4	960,9	987,1	578,8	2,35	2,6	6,42	9,34
5	1187,4	1234,8	720,6	2,31	2,6	9,22	11,04
6	1186,5	1230,4	722,5	2,34	2,6	8,64	10,01
7	1330,8	1382,5	817,6	2,36	2,6	9,15	9,25
8	962,7	998,8	585,2	2,33	2,6	8,73	10,34
9	1019,9	1056,7	622,4	2,35	2,6	8,47	9,54
10	956,3	995,1	579,5	2,3	2,6	9,34	11,36
11	1052,7	1094,1	646,4	2,35	2,6	9,25	9,42
12	1116,8	1165,7	685,1	2,32	2,6	10,17	10,48
PROM	1099,51	1141,1	669,42	2,33	2,6	8,78	10,2

Fuente: (Rhenals& Santos, 2012)

De lo anterior se puede afirmar que:

- La Densidad Real, de las rocas de la cantera Coloncito, es 10,20% mayor a su Densidad aparente, lo cual determina el porcentaje de Porosidad que presentan las mismas.
- Este material, según la *Tabla 21*, corresponde a una roca con porosidad media.
- Se verifica que la densidad es inversamente proporcional a la porosidad. Valores de densidad altos dan como resultado porosidades bajas.

5.2.2. Desgaste por Abrasión

En la *Tabla 22* se presentan los resultados de desgaste por abrasión en las muestras de la cantera Coloncito.

Tabla 23. Resultados de Desgaste por abrasión en material de la cantera Coloncito

MUESTRA	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr)	DESGASTE (%)
1	10000	6231	37,69
2	10000	6152	38,48
3	10000	6195	38,05
PROMEDIO	10000	6192,67	38,07

Fuente:(Rhenals& Santos, 2012)

De lo anterior se infiere:

- Cuando el porcentaje de desgaste es mayor de 50%, se asume que la roca es de mala calidad, si el desgaste es menor de 20%, es excelente. Sin embargo, el porcentaje de desgaste que presentó el material de la cantera Coloncito se encuentra en el orden del 38,07% con lo cual se infiere que este material posee una calidad media.
- Este porcentaje de desgaste nos permite saber que si este material es sometido a continuos procesos de abrasión, perdería la tercera parte de su masa, aproximadamente.

5.2.3. Resistencia a la Compresión

En la *Tabla 24*. Se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión efectuados con la maquina Universal.

Tabla 25. Resultados de Resistencia a la Compresión en material de la cantera Coloncito

MUESTRA	AREA (cm ²)	RESISTENCIA (PSI)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	CARGA (kg)
1	100	4718	345,36	34535,76
2	100	5075	371,49	37149
3	100	4380	320,62	32061,6
4	105	5080	371,86	39044,88
5	105	4703	344,26	36147,26
6	105	4529	331,52	34809,89
7	105	4642	339,79	35678,41
8	105	4627	338,7	35563,12
9	105	4768,6	349,06	36651,46
10	110	4852	355,17	39068,3
11	110	4839	354,21	38963,63
12	110	4803	351,58	38673,76
PROMEDIO			347,8	

Fuente:(Rhenals& Santos,2012)

5.3.MATERIAL DE MURALLAS

Al momento de realizar la prueba de Resistencia a la compresión en el cordón amurallado con el esclerómetro se encontró que esta propiedad varía notablemente en algunas zonas, por lo tanto, los resultados, con ambos equipos, se encuentran discriminados por zonas en las que la diferencia es muy marcada. La zona 1 que va desde el Fuerte de la Tenaza hasta el Baluarte La Merced, la zona 2 que va del Baluarte La Merced al Baluarte Santiago y la zona 3 que va del Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier.

Tabla 19. Resultados de densidad y porosidad del material rocoso de las murallas.

ZONA	VELOCIDAD ULTRASONICA (m/s)	VELOCIDAD ULTRASONICA 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 TOTAL PROMEDIO (%)
1	3382,6	3377,6	2,11	2,11	2,48	2,48	14,83
	3415,4		2,13		2,51		
	3360,3		2,1		2,47		
	3352,1		2,09		2,46		
2	3607,2	3757,1	2,4	2,31	2,68	2,57	10,38
	3820,6		2,27		2,53		
	3820,5		2,27		2,53		
	3780,1		2,29		2,56		
3	3198,4	3247,8	2	2,03	2,35	2,38	14,83
	3305,8		2,07		2,43		
	3256,3		2,03		2,39		
	3230,7		2,02		2,37		
*Estas propiedades se calcularon mediante correlaciones con las muestras testigos.							

Fuente:(Rhenals& Santos, 2012)

De lo anterior se deduce que:

- En la zona 2 se presentaron mayores velocidades ultrasónicas y al efectuar las relaciones con las probetas testigos se obtienen densidades mayores y menores porosidades que en el resto de las zonas.
- Teóricamente, se sabe que a mayor densidad, mayor resistencia a la compresión y menor porosidad. Sin embargo, al contrastar los resultados obtenidos en las zonas 1 y 3, se observa que estas presentan iguales valores de porosidad, a pesar de que la zona 3 es la que posee menos densidad y le correspondería una porosidad mayor. Esto se debe a que las diferencias entre las densidades reales y densidades aparentes son similares en ambos casos.

5.3.1. Resistencia a la Compresión

A continuación se presentan los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en las murallas: en la *Tabla 26*. Se destacan los resultados de la zona 1, en la *Tabla 27* se registró lo referente a la zona 2 y en la *Tabla 28* se hallan los resultados de la zona 3.

Tabla 28. Resultados de la Resistencia a la compresión en la zona 1

MUESTRA	VALORES DE REBOTE R						RESISTENCIA (kg/cm ²)
	1	2	3	4	5	PROMEDIO	
1	38	36	32	34	33	34,6	272
2	25	26	25	25	26	25,4	147,2
3	23	22	22	21	21	21,8	110
4	30	32	31	33	33	31,8	234,4
5	33	36	35	33	34	34,2	264
6	28	31	30	24	26	27,8	177
7	27	29	33	33	29	30,2	212
PROMEDIO	25,63	26,75	26,38	25,88	25,88	29,4	202,37

Fuente:(Rhenals& Santos, 2012)

Tabla 29. Resultados de la Resistencia a la compresión en la zona 2

MUESTRA	VALORES DE REBOTE R						RESISTENCIA (kg/cm ²)
	1	2	3	4	5	PROMEDIO	
1	42	44	43	43	42	42,8	396
2	40	41	41	39	38	39,8	348
3	40	42	43	43	42	42	380
4	47	51	51	47	48	48,8	496
5	36	37	38	33	36	36	290
6	46	46	47	48	46	46,6	459
7	41	42	42	45	42	42,4	388
8	44	43	41	43	45	43,2	404
9	39	37	40	38	39	38,6	332
PROMEDIO	41,67	42,56	42,89	42,11	42	42,24	388,11

Fuente:(Rhenals& Santos, 2012)

Tabla 22. Resultados de la Resistencia a la compresión en la zona 3

MUESTRA	VALORES DE REBOTE R						RESISTENCIA (kg/cm ²)
	1	2	3	4	5	PROMEDIO	
1	17	16	15	22	18	17,6	< 110
2	22	22	21	18	20	20,6	< 110
3	16	15	16	16	22	17	< 110
4	21	22	21	21	19	20,8	< 110
5	15	15	16	17	17	16	< 110
6	14	16	14	18	15	15,4	< 110
7	19	18	20	22	21	20	< 110
8	16	17	18	19	18	17,6	< 110
PROMEDIO	17,5	17,63	17,63	19,13	18,75	18,13	< 110

Fuente: (Rhenals& Santos, 2012)

De acuerdo a lo anterior se infiere que:

- La zona 1 tiene una resistencia promedio de 202,37 kg/cm², la zona 2 tiene una resistencia promedio de 388,11 kg/cm² y la zona 1 tiene una resistencia promedio menor a 110 kg/cm².
- Basándose en la *Tabla 22*.se infiere que el material rocoso de la zona 1 y de la zona 2 es moderadamente resistente mientras que el de la zona 3 es débil.
- La zona 2 presenta rocas con mejores propiedades de resistencia a la compresión.

5.4. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES

Tabla 23. Comparación de propiedades ensayadas para cada material

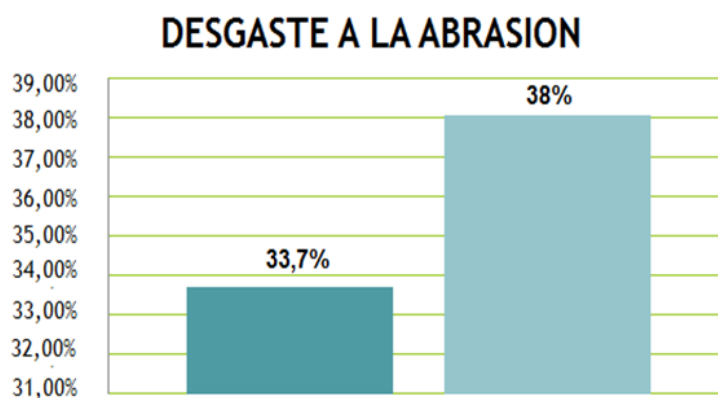
	Tierra Bomba	Coloncito	Zona 1 (Muralla)	Zona 2 (Muralla)	Zona 3 (Muralla)
Desgaste por abrasión (%)	33,7	38,07	-	-	-
Densidad real (gm/cm ³)	2,24	2,6	2,48	2,57	2,38
Densidad Aparente (gm/cm ³)	2,1	2,33	2,11	2,31	2,03
Porosidad (%)	14,57	10,2	14,83	10,38	14,83
Resistencia a la Compresión (kg/cm ²)	110,52	347,8	202,37	388,11	< 110

Fuente: (Autores, 2014)

La tabla 23 muestra los resultados de todos los parámetros ensayados en este estudio:

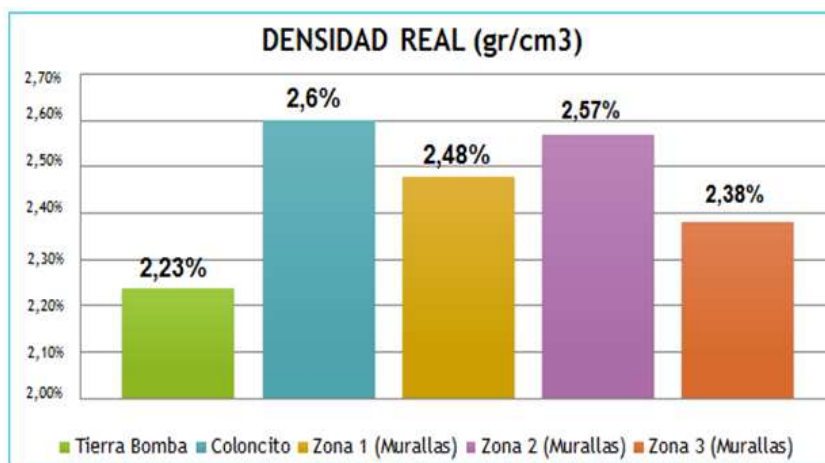
- Se observa que una de las limitaciones de este trabajo fue el no haber ensayado las zonas de las murallas para conocer su desgaste por abrasión. El material de Tierra Bomba presenta mejores resultados de desgaste a la abrasión que el material de Coloncito, ya que si el material se encuentra por debajo del 50% de desgaste a la abrasión es relativamente bueno.
- Con respecto a la densidad real se observa cierta similitud entre el material de Tierra Bomba con 2,24 gm/cm³ y el de la zona 3 de las murallas con 2,38 gm/cm³ por ser el más bajo. La zona 2 con 2,57 gm/cm³, se asemeja al material de Coloncito con 2,6 gm/cm³.
- La densidad Aparente del material de tierra Bomba con 2,1 gm/cm³, se asemeja al material de la zona 1 y 3 de las murallas con 2,11 gm/cm³ y 2,03 gm/cm³, mientras que el de la zona 2 es muy similar al del material de Coloncito.

- Las porosidades del material de Tierra Bomba 14,57 % es similar al de la zona 1 y 3 de las murallas con 14,83%, mientras que la zona 2 10,38% se asemeja con el material de Coloncito con 10,2 %.
- La Resistencia a la compresión del material de Tierra Bomba 110,52kg/cm² es similar al de la zona 3 de las murallas < 110 kg/cm², mientras que el material de Coloncito 347,8 kg/cm² es más similar al material de la zona 2 de las murallas 388,11 kg/cm².
- El material de Coloncito posee propiedades similares al de la zona 2 de las murallas.
- El material de Tierra Bomba posee características similares al de la zona 3 de las murallas y algunas relativas a la zona 1.



Gráfica 1. Desgaste de material de canteras
Fuente: (Autores, 2014)

- La *Gráfica 2*, relaciona los porcentajes de desgaste del material calcáreo de las canteras de Tierra Bomba y Coloncito, de donde se observa que el primero tiene menor porcentaje de desgaste. Este es un parámetro de calidad de las rocas que fue importante al momento de plantear algunas conclusiones.

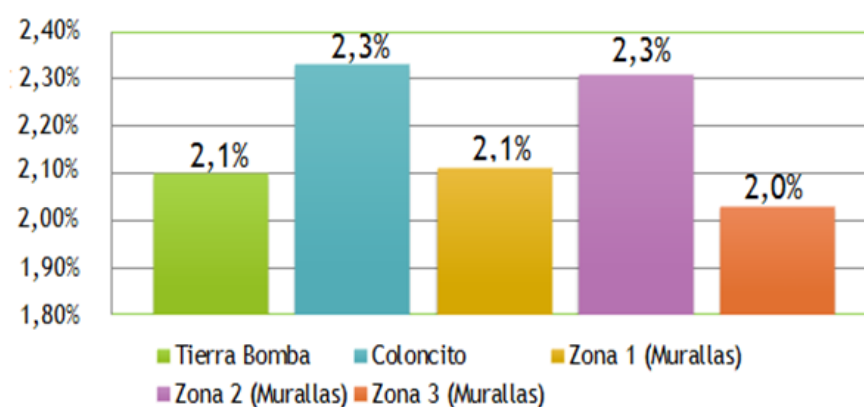


Gráfica 3. Comparación de densidades reales
Fuente: (Autores, 2014)

Notablemente, en la Gráfica 3, las densidades reales de las piedras calizas de las canteras Coloncito y La Zona 2 de las murallas poseen mayores densidades reales que las rocas de Tierra Bomba y las de las zonas 1 y 3 de las murallas, , por tanto se puede decir que:

- La diferencia porcentual entre la densidad real del material rocoso de la cantera Coloncito con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas es de +4,61%, con la zona 2 es de +1,15% y con la zona 3 del +8,46%, dejando ver que la roca de Coloncito es más pesada que la de las murallas.
- De acuerdo a la diferencia porcentual entre la densidad real del material rocoso que constituye las murallas con respecto a la de la cantera de Tierra Bomba se infiere que: La densidad real de la cantera de Tierra Bomba es 11,21% menor que las rocas de la zona 1 de las murallas, del 15,25% con zona 2 y con la zona 3 del 6,73%, dejando ver que las rocas de esta cantera es menos pesada que las rocas de las zonas 1 y 2, asemejándose más a la zona 3 de las murallas.
- Comparando las 3 zonas de las murallas la que presenta menor valor de densidad real es la zona 3.

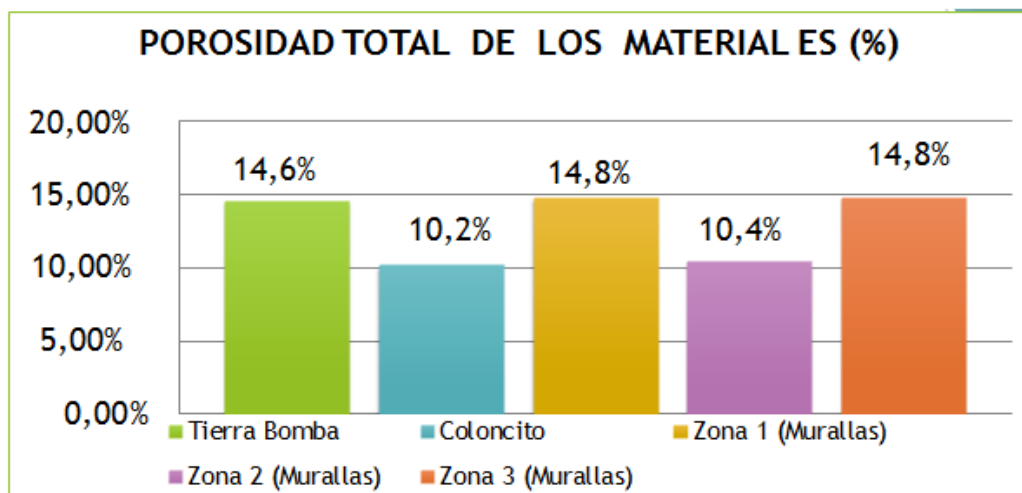
DENSIDAD APARENTE (gr/cm³)



Gráfica 4. Comparación de densidades aparentes
Fuente: (Autores, 2014)

De acuerdo a la Gráfica 4, la densidad aparente de las piedras calizas de la cantera Coloncito es mayor que las densidades aparentes de las rocas calizas presentes en cada una de las zonas de la muralla, e incluso mayor que la densidad aparente de las rocas de la cantera de Tierra Bomba. Por otro lado, las densidades aparentes de las piedras calizas presentes en las zonas 1 y 3 de las murallas, son las más semejantes a la densidad de las calizas de la cantera de Tierra Bomba.

- La diferencia porcentual entre la densidad aparente del material rocoso de la cantera Coloncito con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas es de 8,69%, con la zona 2 es de 0% y con la zona 3 del 13,04%.
- La diferencia porcentual entre la densidad aparente del material rocoso de la cantera de Tierra Bomba con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas es de 0,00%, con la zona 2 es del 9,52% menor y con la zona 3 del 4,76% menor.
- Comparando las 3 zonas de las murallas la que presenta menor valor de densidad aparente es la zona 3.

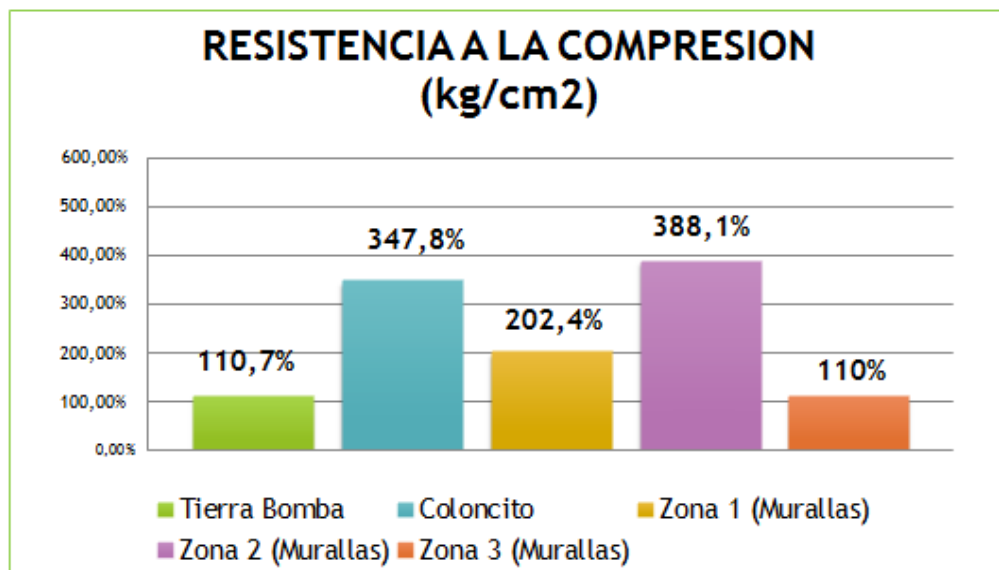


Gráfica 5. Comparación de porosidades totales

Fuente: (Autores, 2014)

Según la Gráfica 5, los mayores porcentajes de porosidad total se encuentran en las rocas de la cantera de la isla de Tierra Bomba y en la zona 1 y 3 del cordón amurallado, mientras que las rocas de la cantera Coloncito y la zona 2 poseen una porosidad total menor. Por tanto se puede decir que:

- La diferencia porcentual entre la porosidad total del material rocoso de la cantera Coloncito es menor con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas en 45,09%, en la zona 2 es del 1,96% y con la zona 3 del 45,09%.
- La diferencia porcentual entre la porosidad total del material rocoso de la cantera de Tierra Bomba con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 y zona 3 de las murallas es de 1,37% menor, con la zona 2 es del 28,77% mayor.
- Por ser las menos densas, las zonas 1 y 3 presentan mayor porosidad en sus rocas calizas.



Gráfica 6. Comparación de resistencias a la compresión
Fuente: (Autores, 2014).

Según la Gráfica 6, la zona 2 posee las rocas calizas con la mayor resistencia a la compresión de las evaluadas en esta investigación. Por tanto se puede decir que:

- La diferencia porcentual entre la resistencia a la compresión del material rocoso de la cantera Coloncito con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas es de 41,81% mayor, con la zona 2 es de 11,59% menor y con la zona 3 del 68,37% mayor.
- La diferencia porcentual entre la resistencia a la compresión del material rocoso de la cantera de Tierra Bomba con respecto a la densidad real de las rocas de la zona 1 de las murallas es de 82,84% mayor, con la zona 2 es del 250,59% menor y con la zona 3 del 0,63% mayor.
- La resistencia a la compresión del material de las canteras Coloncito es menor que la que se halla en el material de la zona 2.
- El material rocoso de la cantera de Tierra Bomba posee resistencia a la compresión similar a la zona 3 de las murallas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las murallas presenta variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas a lo largo de la misma, Debido a esto, se organizaron los resultados en tres zonas que corresponden a las siguientes: Zona 1 (Fuerte de la Tenaza hasta el Baluarte La Merced), zona 2 (Baluarte La Merced al Baluarte Santiago) y zona 3 (Baluarte Santiago al Baluarte San Francisco Javier).
- 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. Debido a estos resultados arrojados en los ensayos realizados a este material y la similitud que presentó con los estudios previos realizados al cordón amurallado sobretodo en su porosidad y resistencia a la compresión, (Ver Tabla 23), Se corrobora el hecho histórico de la utilización del material pétreo extraído de las canteras de Tierra Bomba en la construcción de las murallas de Cartagena de Indias.
- 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%. Este material presenta un porcentaje de desgaste aceptable por lo que, en términos de calidad, se puede afirmar que es un material relativamente bueno e indica que es óptimo para ser utilizado en procesos de restauración y rehabilitación de esta zona de la muralla.
- Es importante efectuar estudios en la zona 1 de las murallas, puesto que es el tramo de los estudiados que no coincide con los resultados de la densidad real y la resistencia a la compresión del material de Tierra Bomba ni con el de Coloncito, asemejándose a la densidad aparente y a la porosidad presente en el material de Tierra Bomba, esto se debe a las características de la roca que se utilizó en su construcción.

- Se recomienda efectuar pruebas de desgaste por acción de los sulfatos a las rocas que se utilizan para realizar las restauraciones puesto que, los materiales que forman parte de la estructura de las murallas se encuentran constantemente expuestos a sulfatos por encontrarse cerca del mar y puede ser un factor determinante para evaluar el comportamiento que tendría el material al hacer parte de la estructura.
- Se recomienda analizar parámetros como lo es el Desgaste por abrasión en el cordón amurallado, puesto que en esta investigación solo se utilizó esta propiedad como un parámetro de calidad del material extraído de las canteras seleccionadas, pero no se determinó esta propiedad en las murallas.
- En posteriores investigaciones, sería muy interesante efectuar estudios con pruebas modernas como lo es la termografía infrarroja, para medir temperaturas de las superficies sin tener ningún tipo de contacto con ella.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(s.f.). Obtenido de <http://www.google.com.co/search?q=RESTAURACION+DE+LAS+MURALLAS+DE+CARTAGENA+DE+INDIAS+SECTOR+PARQUE+DE+LA+MARINA&hl>

Alcaldía de Cartagena. (20 de 11 de 2001). Decreto 0977 de 2001. *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias*. Cartagena.

Alcaldía de Cartagena. (20 de 11 de 2001). Decreto 0977 de 2001. *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias*.

Ayala, F., & Andreu, F. (2006). *Método del esclerómetro o martillo de Schmidt*. Instituto Geológico y Minero de España.

Balado, E., & Flores, 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. Introducción a una metodología para la evaluación del estado de las construcciones realizadas con rocas carbonatadas*. Recuperado el 29 de 08 de 2011, de Cuba arqueológica: <http://www.cubaarqueologica.org/index.php?q=node/161>

Berganza, A., & Hernández, O. (2007). *Ensayos no destructivos*. Boletín Iram.

Buendía, C., & Barboza, L. *Estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena de Indias (Baluarte Santo Domingo)*. Cartagena: Universidad de Cartagena.

Cabrera, A. (9 de Agosto de 2011). Obras de conservación en la ciudad de Cartagena. (L. Santos, & L. Rhenals, Entrevistadores)

Cechak, T., Gerndt, J., Kopecká, I., & Musílek, L. (01 de 2004). X-ray fluorescence in research on Czech cultural monuments. *ScienceDirect. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 735-740.

Ciencia del suelo. (07 de 2007). Recuperado el 2014, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672007000100007&script=sci_arttext

Construaprende. (2009). *Resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados*. Recuperado el 23 de 08 de 2011, de Construaprende. Ingeniería Civil y Arquitectura: http://www.construaprende.com/Lab/12/Prac12_1.htm

Da Silva, A. (2010). *Porosidad*. Recuperado el 15 de 09 de 2011, de La comunidad petrolera: <http://www.lacomunidadpetrolera.com/cursos/propiedades-de-la-roca-yacimiento>

El blog de la liga Marval. (2001). Recuperado el 11 de 2014, de <http://ligiamarval.blogspot.com/2009/05/pequena-venecia.html>

Escuela Taller Cartagena de Indias. (15 de 10 de 2014). Recuperado el 2014, de <http://www.patrimoniodecartagena.com/es/fortificaciones/espigon-de-la-tenaza>

España, J., & Tapia, M. (2008). *Parámetros para la normalización de las mamposterías de tipo colonial.* Cartagena: Universidad de Cartagena.

Fadul, C. (2001). *Evolucion legal de la proteccion al patrimonio.* (ICOMOS) Recuperado el 05 de Mayo de 2013, de http://www.esicomos.org/nueva_carpeta/libroTOLEDO/34_claudiafadul.htm

Google maps. (2014). Recuperado el 11 de 2014, de <https://www.google.es/maps/place/Isla+Tierra+Bomba,+Colombia/@10.3527546,-75.5673053,4533m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x8ef628e507a62275:0x5ebf517e4b3c9238>

Guerrero, C. (2001). Rocas Calizas. *Temas de ciencia y tecnología* , 15 (14), 3-14.

Instron. (2011). *Resistencia a la compresion.* Recuperado el 04 de 09 de 2011, de Instron. La diferencia se puede medir: <http://www.instron.com.es/wa/glossary/Compressive-Strength.aspx>

INVIAS. (2007). *Resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3 /4") por medio de la maquina de los Angeles.* Colombia.

La comunidad petrolera. (2012). Obtenido de <http://www.lacomunidadpetrolera.com/biblioteca/>

Lombillo, I., & Villegas, L. (2005). *Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación estructural del patrimonio.* Universidad de Cantabria: Grupo de Tecnología de la Edificación.

Master turismo. (s.f.). Recuperado el 23 de 03 de 2013, de <http://master turismo.es>

Meisel, A. (2006). Las murallas de Cartagena. *Semana* .

Meisel, A. (2006). Las murallas de Cartagena, por su valor arquitectónico e histórico es uno de los simbolos imborrables de Colombia. *Semana* .

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

Moropoulou, & Polikreti. (26 de 03 de 2008). *Journal of cultural heritage*. Recuperado el 01 de 12 de 2014, de Principal Component Analysis in monument conservation: Three application examples: www.sciencedirect.com

Moropoulou, A., & Polikreti, K. (2009). Principal Component Analysis in monument conservation: Three application examples. *ScienceDirect. Journal of cultural Heritage*, 10 (1), 73-81.

Orden del Temple. (2009). Recuperado el 11 de 2014, de Castillos defensa pasiva VI: http://www.ordendeltemple.net/Publicaciones/index.php?option=com_content&view=article&id=14:castillos-defensa-pasiva-vi&catid=7:castillos

PCE instrument. (2013). Recuperado el 2014, de https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-de-medida/medidor/medidor-de-dureza-pce-instruments-medidor-de-dureza-pce-ht-225a-det_94127.htm

Restauracion de las murallas de Cartagena de Indias. (s.f.). Recuperado el 02 de 05 de 2013, de <http://www.google.com.co/search?q=RESTAURACION+DE+LAS+MURALLAS+DE+CARTAGENA+DE+INDIAS+SECTOR+PARQUE+DE+LA+MARINA&hl>

Restauracion de las murallas de Cartagena de Indias. (s.f.). Recuperado el 19 de 03 de 2013, de <http://www.google.com.co:search&RESTAURACION+DE+LAS+MURALLAS+DE+CARTAGENA+DE+INDIAS+SECTOR+PARQUE+DE+LA+MARINA&h>

Rodriguez, J. (2006). *Propiedades físicas: Densidad y Porosidad*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.

Segovia, R. (1982). *Fortificaciones de Cartagena de Indias*. (Carlos Valencia Editores) Recuperado el 06 de Mayo de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/36107723/Las-Fortificaciones-de-Cartagena-de-Indias>

Semana.com. (2012). Recuperado el 2013, de Puerto, fortificaciones y conjunto monumental de Cartagena (1984): <http://www.semana.com/especiales/patrimonios-colombia-humanidad/cartagena-de-indias.html>

Sociedad de mejoras publicas. (2012). Recuperado el 09 de Marzo de 2013, de www.fortificacionesdecartagena.com/es/manual-uso-murallas.pdf

Sociedad de mejoras publicas de Cartagena. (2012). Recuperado el 11 de 2014, de http://www.fortificacionesdecartagena.com/es/fortificaciones/baluarte_san_lucas.htm

Sociedad de mejoras publicas. (2009). *Fortificaciones*. Recuperado el 06 de Abril de 2013, de http://fortificacionesdecartagena.com/es/fortificaciones/baluarte_san_francisco.htm

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

Torok, A., & Prikryl, R. (2010). Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments. *ScienceDirect. Engineering Geology* , 114, 139-142.

Ucros travel. (s.f.). *Catalogo I : Baluartes, Fuertes y Castillos Cartagena de Indias*. Recuperado el 13 de Mayo de 2013, de http://www.colombiaenunsolopunto.com/Baluartes_Walls_Cartagena/Baluarde-San-Juan-Evangelista-Cartagena-Bodas-Fiestas-Matrimonios-Eventos-Wedding-Colombia-4.jpg

Universidad de Granada. (16 de 09 de 2007). *Propiedades de las rocas de construccion y ornamentacion*. Recuperado el 20 de 09 de 2011, de ugr: <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

www.cuentatuviaje.net. (s.f.). *Viaje: Cartagena de Indias*. Recuperado el 24 de Abril de 2013, de http://www.cuentatuviaje.net/fotos_viajes/small_Muralla%202.jpg

www.dondeviajar.net. (s.f.). *Cartagena: Lo mejor del caribe Colombiano*. Recuperado el 23 de Abril de 2013, de <http://www.dondeviajar.net/wp-content/uploads/2009/05/41muralla-cartagena.jpg>

www.peru.com. (s.f.). *Colombia: Recorre las bellas calles de Cartagena de Indias*. (<http://peru.com/viajes/noticia-de-viajes/colombia-recorre-bellas-calles-antigua-cartagena-indias-fotos-noticia-132789-508790>) Recuperado el 15 de 03 de 2013, de <http://cde.peru.com/ima/0/0/5/0/8/508790/924x530.jpg>