



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



**EVALUACIÓN, DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL A LAS  
MURALLAS DE CARTAGENA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y DETERMINANDO LA CONFIABILIDAD DE  
ÉSTAS: SECTOR BALUARTE DE SANTO DOMINGO.**

**DANIEL EDUARDO AGUILAR HERNÁNDEZ**

**JONATHAN SMITH MARTÍNEZ FLÓREZ**

**AUTORES**



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2017**



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



**EVALUACIÓN, DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL A LAS  
MURALLAS DE CARTAGENA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y DETERMINANDO LA CONFIABILIDAD DE  
ÉSTAS: SECTOR BALUARTE DE SANTO DOMINGO.**

**DANIEL EDUARDO AGUILAR HERNÁNDEZ**

**JONATHAN SMITH MARTÍNEZ FLÓREZ**

**AUTORES**

**DIRECTOR:**

**MSC. JORGE ÁLVAREZ CARRASCAL.**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:**

**ESCONPAT**

**LÍNEA:**

**GESTIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**2017**



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



## NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

---

**Firma del director**  
**JORGE ALVAREZ CARRASCAL**

---

**Firma del jurado**  
**MODESTO BARRIOS FONTALVO**

---

**Firma del jurado**  
**ARNOLDO BERROCAL OLAVE**



## AGRADECIMIENTOS

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

A la Universidad de Cartagena por brindarnos la oportunidad de formarnos tanto profesional como éticamente.

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

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

A la empresa “KER Ingeniería S.A.S” por el préstamo de sus equipos y su personal experimentado que fueron de gran utilidad para llevar a cabo nuestra investigación.



## Tabla de Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>1. MARCO REFERENCIAL</b> .....	15
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	15
<b>1.2 ESTADO DEL ARTE</b> .....	19
<b>1.3 MARCO TEORICO</b> .....	22
<b>1.3.1 Tipología de las murallas</b> .....	22
<b>1.3.2 Ensayos no destructivos (END)</b> .....	22
1.3.2.1 Historia de los END .....	25
1.3.2.2 Técnicas de END más usuales.....	27
1.3.2.2.1 Radiografía.....	28
1.3.2.2.2 Líquidos penetrantes.....	29
1.3.2.2.3 Esclerometria.....	30
1.3.2.2.3.1 Tipos de martillo .....	31
1.3.2.2.3.2 Descripción y principio de funcionamiento .....	31
1.3.2.2.3.3 Procedimiento de medida.....	33
1.3.2.2.4 Ultrasonidos .....	40
1.3.2.2.4.1 Equipo básico .....	42
1.3.2.2.4.2 Características generales de las ondas ultrasónicas.....	43
1.3.2.2.4.3 Métodos básicos de inspección.....	43
1.3.2.2.4.3.1 Método Sonic Echo. ....	43
1.3.2.2.4.3.2 Método Impact Echo. ....	45
1.3.2.2.4.3.3 Método Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	46
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	49
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	49
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b> .....	49
<b>3. ALCANCE</b> .....	50
<b>3.1 DELIMITACION ESPACIAL</b> .....	50



<b>3.2 DELIMITACION TEMPORAL</b> .....	51
<b>3.3 DELIMITACION CONCEPTUAL</b> .....	51
<b>3.4 LIMITACIONES Y/O EXCEPCIONES</b> .....	52
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	53
<b>4.1 INFORMACION PRIMARIA Y SECUNDARIA</b> .....	54
<b>4.1.1 Recolección de información relacionada a la investigación</b> .....	54
<b>5. RESULTADOS</b> .....	57
<b>5.1 DETERMINACION DE HUMEDAD Y TEMPERATURA</b> .....	57
<b>5.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b> .....	59
<b>5.2.1 Esclerómetro</b> .....	60
<b>5.2.2 Ultrasonic pulse velocity (UPV)</b> .....	69
<b>5.2.3 Resistencia con esclerómetro y Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</b> .....	78
<b>5.3 RECOMENDACIÓN PARA PLAN DE INTERVENCION</b> .....	79
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	87
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	89
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	90



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes.....	32
Figura 2. Principio de funcionamiento del martillo.....	33
Figura 3. Preparación de la superficie de ensayo. ....	34
Figura 4. Ejecución del ensayo.....	34
Figura 5. Soporte para testigos de roca.....	35
Figura 6. Yunque de prueba. ....	36
Figura 7. Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión y rebote .....	37
Figura 8. Sistema de ensayo por ultrasonido.....	41
Figura 9. Transmisión de la onda .....	45
Figura 10. Aplicación del ensayo UPV .....	48
Figura 11. Vista aérea Baluarte Santo Domingo en Cartagena de Indias.....	50
Figura 12. Tramo del cordón amurallado estudiado.....	51
Figura 13. Esclerómetro Smichdt .....	54
Figura 14. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	55
Figura 15. Patología #1.....	80
Figura 16. Patología #2.....	81
Figura 17. Patología #3.....	82
Figura 18. Patología #4.....	83
Figura 19. Patología #5.....	84
Figura 20. Patología #6.....	85



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de END según el método físico.....	24
Tabla 2. Clasificación de END según la posición del defecto.....	24
Tabla 3. Aplicabilidad de las distintas técnicas de END.....	28
Tabla 4. Clasificación de la resistencia según la ISRM. ....	38
Tabla 5. Valores típicos de número de rebotes medidos con martillo tipo L para diferentes rocas.....	39
Tabla 6. Peso húmedo.....	57
Tabla 7. Peso seco .....	58
Tabla 8. Humedad natural .....	59
Tabla 9. Lecturas del rebote del esclerómetro.....	60
Tabla 10. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 1 y análisis de los resultados.....	61
Tabla 11. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 2 y análisis de los resultados.....	62
Tabla 12. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 3 y análisis de los resultados.....	63
Tabla 13. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 4 y análisis de los resultados.....	64
Tabla 14. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 5 y análisis de los resultados.....	65
Tabla 15. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 6 y análisis de los resultados.....	66
Tabla 16. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 7 y análisis de los resultados.....	67
Tabla 17. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 8 y análisis de los resultados.....	68
Tabla 18. Lecturas con el equipo de ultrasonido para cada punto.....	69
Tabla 19. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 1 y análisis de los resultados.....	70
Tabla 20. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 2 y análisis de los resultados.....	71
Tabla 21. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 3 y análisis de los resultados.....	72
Tabla 22. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 4 y análisis de los resultados.....	73
Tabla 23. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 5 y análisis de los resultados.....	74
Tabla 24. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 6 y análisis de los resultados.....	75
Tabla 25. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 7 y análisis de los resultados.....	76
Tabla 26. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 8 y análisis de los resultados.....	77
Tabla 27. Resumen de los datos obtenidos.....	78
Tabla 28. diagnóstico patología #1.....	80
Tabla 29. Diagnóstico patología #2.....	81



Tabla 30. Diagnóstico Patología #3.....	82
Tabla 31. Diagnóstico Patología #4.....	83
Tabla 32. Diagnóstico patología #5.....	84
Tabla 33. Diagnóstico patología #6.....	85



## RESUMEN

Cartagena es un ejemplo eminente de la arquitectura militar de los siglos XVI, XVII y XVIII, la más extensa del Nuevo Mundo y, actualmente, una de las más completas. En el siglo XVIII, nuevas adiciones dieron al conjunto fortificado su amplitud actual. Debido a que las murallas representan un gran valor para la ciudad, siendo un patrimonio para la Humanidad declarado por la UNESCO en 1984, el estudio de estas es de suma importancia. Por este motivo, se realizó una evaluación, diagnóstico estructural y funcional de la muralla en el tramo comprendido entre el baluarte de Santo Domingo y el baluarte de Santa Cruz, con el fin de preservar en el tiempo el patrimonio que es de un gran interés para la ciudad de Cartagena. Se hicieron necesarias la aplicación de técnicas no destructivas para conservar el patrimonio, tales técnicas fueron ultrasonido y esclerómetro, obtuvimos una resistencia promedio del sector estudiado de 204,6 Kg/cm<sup>2</sup> para el equipo de esclerómetro y para el equipo de ultrasonido UPV una resistencia promedio de 202,5 Kg/cm<sup>2</sup> lo cual nos dice que la roca se encuentra clasificada en moderadamente resistente según la ISRM. Además, se hicieron toma de datos referentes a la humedad y temperatura en el punto de aplicación de los ensayos, y se conocieron los parámetros que inciden directamente en la aplicación de los ensayos no destructivos como los son la porosidad y continuidad del material que compone la muralla.



## ABSTRACT

Cartagena is an eminent example of the military architecture of the sixteenth, seventeenth and eighteenth centuries, the most extensive of the New World and, currently, one of the most complete. In the eighteenth century, new additions gave the fortified complex its current breadth. Because the walls represent a great value for the city, being a heritage for Humanity declared by UNESCO in 1984, the study of these is of the utmost importance. For this reason, an assessment was made, structural and functional diagnosis of the wall in the section between the bastion of Santo Domingo and the bastion of Santa Cruz, in order to preserve in time the heritage that is of great interest for the city of Cartagena. The application of non-destructive techniques was necessary to conserve the patrimony, such techniques were ultrasound and sclerometer, we obtained an average resistance of the sector studied of 204,6 Kg / cm<sup>2</sup> for the equipment of sclerometer and for the UPV ultrasound equipment an average resistance of 202.5 Kg / cm<sup>2</sup> which tells us that the rock is classified as moderately resistant according to the ISRM. In addition, data were taken regarding humidity and temperature at the point of application of the tests, and the parameters that directly affect the application of non-destructive tests were known, such as the porosity and continuity of the material that makes up the Wall.



## INTRODUCCIÓN

El cordón amurallado de Cartagena de Indias es uno de los símbolos de Colombia con un gran valor arquitectónico e histórico, siendo un patrimonio para la Humanidad declarado por la UNESCO en 1984; la vocación turística de la ciudad aparece en los años veinte, más que todo con visitas de carácter comercial o diplomático. Sin embargo, hay que esperar la década de 1960 para asistir a un desarrollo turístico más afirmado y amplio, en primer lugar, con un turismo de playa (más nacional) al cual se añadirá progresivamente un turismo cultural (más internacional). (Cunin & Rinaudo, 2010)

Debido a que las murallas representan un gran valor para la ciudad, el estudio de estas es de suma importancia, por tal motivo los estudios que aquí se realicen no deben dañar en lo más mínimo su estructura, y por esto al existir tanto ensayos destructivos como no destructivos, se opta por implementar ensayos de tipo no destructivos que tienen como objetivo la evaluación del estado de los materiales sin que queden afectadas las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los mismos y que se realizan sin producir daños que afecten a su funcionalidad. (Ramírez Gómez, 1996)

Con el paso de los años los distintos baluartes de las murallas han empezado a tener problemas por distintos factores físicos y químicos a los que se encuentra expuesta, presentando cambios en su superficie y en el estado interno de su estructura, esto representa un riesgo para la integridad física de aquellas personas que transiten o visiten este patrimonio, ubicado en el centro histórico de la ciudad. La viceministra de cultura María Claudia López, indicó que cabe la posibilidad que Cartagena deje de ser patrimonio Histórico y cultural de la humanidad debido a que los monumentos del centro histórico no cuentan con un plan especial de manejo (PEM) (El universal, 2014). Es importante tener en cuenta que se han realizado estudios para diagnosticar el estado de las murallas en sectores como el comprendido entre el baluarte de la Merced y el baluarte San Francisco Javier y el



comprendido entre el baluarte San Pedro Mártir y el baluarte de la Merced en los que se encontraron problemas de deterioro y varios tipos de patologías, estas investigaciones se llevaron a cabo aplicando técnicas no destructivas tales como el esclerómetro (Díaz Andrade, & Méndez Pineda, 2015), esto sin tener en cuenta parámetros que pueden afectar la confiabilidad del resultado final de las pruebas como lo son la humedad, porosidad, homogeneidad, uniformidad del material entre otros. Por lo tanto, es pertinente evaluar y diagnosticar el estado actual tanto estructural como funcional de las murallas específicamente al Baluarte de Santo Domingo y al tramo de muralla entre este baluarte y el Baluarte Santa Cruz, aplicando técnicas no destructivas, teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados, esto con la finalidad de hacer una comparación con los datos obtenidos en las anteriores investigaciones trabajadas en la muralla y determinar si estos nuevos datos presenta una diferencia significativa y por consiguiente establecer que estos ensayos si pueden ser confiables.

Este proyecto tiene como justificación la protección de las murallas de Cartagena, teniendo en cuenta que son un patrimonio importante tanto para la ciudad como para el país; además otro punto fundamental que argumenta este proyecto es, poder demostrar la confiabilidad de los ensayos no destructivos, teniendo en cuenta que se han realizado en otros trabajos de tesis, tal es el caso de la investigación titulada *“PLAN DE INTERVENCION Y MONITOREO DE LAS PATOLOGIAS DEL CORDON AMURALLADO DEL CENTRO HISTORICO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS CASO DE ESTUDIO: BALUARTE LA MERCED- BALUARTE SAN FRANCISCO JAVIER”* en el cual los valores de la resistencia a la compresión en la roca estudiada son valores muy bajos, esto debido a que no se tuvieron en cuenta parámetros necesarios para la aplicación pertinente de los ensayos, como lo son la humedad, porosidad, homogeneidad y otros más, que sí serán tomados en consideración para el desarrollo de esta investigación.

Para desarrollar este proyecto de grado se plantean unas preguntas de investigación, que tienen como base la hipótesis y los objetivos específicos de este proyecto, estas son: ¿los



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



resultados obtenidos demuestran que los ensayos no destructivos aplicados a la muralla de Cartagena sí son confiables?, ¿es necesario realizar obras de intervención para el mejoramiento del baluarte de Santo Domingo?, ¿cuáles de estas técnicas no destructivas arrojan datos más confiables?, ¿Qué factores físicos superficiales intervienen en la obtención de datos y en la aplicación de estas técnicas no destructivas?



## 1. MARCO REFERENCIAL

A través de los años se han realizado múltiples estudios al cordón amurallado de la ciudad de Cartagena de Indias, teniendo en cuenta que se ha visto afectada por diferentes factores de tipo químico y físico; por tal razón es fundamental diagnosticar el estado en que se encuentran, para así poder realizar un mejoramiento en estas. Algunas de esas investigaciones son:

### 1.1 ANTECEDENTES

En el año 2012, se realizó en la Universidad de Cartagena un estudio 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*” (Lilia Carolina Rhenals Acuña Y Luis Eduardo Santos de Ávila, 2012), el objetivo de este trabajo fue comparar las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso que constituye la estructura de las murallas de Cartagena y el utilizado para su restauración y rehabilitación, mediante ensayos destructivos y no destructivos para así establecer qué cantera cuenta con el material rocoso óptimo requerido en este tipo de obras, con el fin de garantizar la conservación de las características del monumento. Para su cumplimiento, se desarrolló una investigación de tipo mixto en la cual se realizó una revisión bibliográfica del tema, ensayos de laboratorio al material rocoso de las canteras Coloncito y La Constancia para conocer propiedades importantes como la Densidad, Desgaste, Resistencia a la Compresión y Porosidad y, de igual manera, se efectuaron ensayos no destructivos con Pulso ultrasónico y Esclerómetro sobre Las Murallas con el fin de obtener las propiedades del material antiguo.

Como resultado de esto, el material de la cantera Coloncito presentó las mejores propiedades físicas y mecánicas, y muestra ser de buena calidad. Además, se encontró que las propiedades varían a lo largo del tramo de muralla analizado por lo cual el estudio de esta se dividió en tres zonas diferentes. En la zona 1 y 3, para las obras de restauración y rehabilitación de las



murallas, se presenta como óptimo el material calcáreo de la cantera La Constancia, mientras que en la zona 2, para las obras de restauración y rehabilitación de las murallas, se presenta como óptimo el material calcáreo de la cantera Coloncito debido a que la mayoría de las propiedades que se evaluaron presentan similitudes con el material que hace parte de la estructura de las murallas en estas zonas.

Cabe destacar que se han realizado estudios no solo a las murallas para determinar su estado, sino a edificaciones que se encuentran en el centro histórico de la ciudad de Cartagena, uno de estos es “*EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DE LA CASA CURAL DE LA IGLESIA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO DE CARTAGENA DE INDIAS*” donde sus autores Efrain Antonio Varela Ramirez e Irving David Zetien Silva en el año 2013 realizaron una evaluación cualitativa y diagnóstico patológico de la Casa Cural de la Iglesia de Santo Toribio de Mogrovejo de Cartagena de Indias. Este constó de una inspección preliminar detallada de toda la Casa Cural de la iglesia de Santo Toribio de Mogrovejo, especialmente de los elementos estructurales, que, con la adición del registro fotográfico recolectado, brindaron como resultado una caracterización de cada una de las patologías encontradas, además se hizo la aplicación de un ensayo no destructivo para determinar las características y el estado de los elementos que conforman la Casa Cural, el cual fue el ensayo de esclerómetro. También fue realizada una modelación de la Casa Cural por medio del software AutoCAD 2010, y posteriormente se llevó a cabo un estudio de cargas de acuerdo a la NSR 10, realizando un análisis dinámico computarizado por medio de ETABS 9.7.3.

Los autores llegan a la conclusión que la investigación que se llevó a cabo no es del todo una evaluación patológica profunda y tampoco corresponde a un estudio de vulnerabilidad sísmica severo, pero maneja los conceptos y objetivos de ambos, con la ventaja de que es mucho más rápida y económica. Además, recomiendan que este formato utilizado en la investigación puede ser implementado donde se requieran estudios preliminares.

Para el año 2014, en la Universidad de Cartagena se realizó una tesis titulada “*EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL FUERTE SAN FERNANDO DE*



*BOCACHICA*”, llevado a cabo por Jeiner Luis Navarro Oyola y Gustavo Andrés Trujillo Ordoñez, quienes realizaron un diagnóstico del Fuerte San Fernando de Bocachica a través de un estudio patológico y de vulnerabilidad sísmica, ajustándolo a las especificaciones de la Norma de Construcción Sismo Resistente de Colombia (NSR-10), con el fin de realizar soluciones para la conservación del monumento.

De acuerdo a los resultados obtenidos concluyeron que el estudio patológico y de vulnerabilidad sísmica permitió dar un veredicto del estado de la estructura. Con la evaluación patológica se pudo observar que el fuerte está afectado por daños y/o afectaciones que se encuentran en gran parte de su área, entre los daños que se encontraron en el fuerte, se identificaron caries superficiales, profundas, pérdida de los sillares, pérdida del pañete, entre otros. Con los resultados obtenidos de la modelación estructural del fuerte se plantearon soluciones de reforzamiento a base de fibra de carbón que a diferencia del acero no sufre de carbonatación lo cual es una desventaja en cuanto a la pérdida de sus propiedades mecánicas.

En el año 2015, se llevó a cabo en la Universidad de Cartagena un estudio llamado “*PLAN DE INTERVENCION Y MONITOREO DE LAS PATOLOGIAS DEL CORDON AMURALLADO DEL CENTRO HISTORICO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS CASO DE ESTUDIO: BALUARTE LA MERCED- BALUARTE SAN FRANCISCO JAVIER*” (Javier Hernando Morelo Gonzalez) el cual consistió en una inspección visual, un registro patológico, georreferenciación y ensayos físico mecánicos de las patologías que afectan significativamente el cordón amurallado. En este estudio se analizaron los resultados a partir del ensayo de esclerometría, y de la georreferenciación a las patologías seleccionadas. Dichos resultados fueron comparados con la resistencia de una roca presente en las murallas que se mostraba en buen estado, y también se hizo una comparación con el material extraído de las canteras Coloncito y La Constancia. Como resultados y conclusiones se llegó a que en algunas zonas de este tramo, el material constitutivo se encuentra en un proceso avanzado de deterioro entre los cuales se encontraron problemas patológicos, tales como caries superficiales y profundas, desprendimiento, pérdida de pañete, entre otras; por tal razón los



autores llegan a la conclusión de que este sector sufre de una falta de mantenimiento adecuado a cada tipo de patología, además de carencia de vigilancia y control por parte de las autoridades competentes.

Las limitaciones de esta tesis fueron que no se realizó un estudio de vulnerabilidad sísmica resistente, ni una modelación en software y además que para las soluciones para la preservación del monumento no se tuvo en cuenta el estudio de pre-factibilidad económica.

En el año 2015, se realizó en la Universidad de Cartagena un estudio titulado, “*PLAN PARA INTERVENCIÓN Y MONITOREO DE LAS PATOLOGÍAS DEL CORDÓN AMURALLADO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS CASO DE ESTUDIO: TRAMO COMPRENDIDO DESDE EL BALUARTE SAN PEDRO MARTIR HASTA EL BALUARTE DE LA MERCED*” (Luis Carlos Díaz Andrade Y John Jairo Méndez, 2015), el cual consistió en la aplicación de un ensayo no destructivo con esclerómetro al tramo mencionado anteriormente, se hicieron ensayos en la roca que presentaba problemas y además en rocas que se encontraban en una composición mucho más óptima de acuerdo al análisis patológico realizado por los autores, esto con la finalidad de verificar el estado actual del material constitutivo de la muralla. Posteriormente se realizó un registro fotográfico y una ficha técnica de cada patología encontrada en la cual se especificó el tipo de problema encontrado, localización y recomendación de este para su posterior intervención.

Los resultados de este estudio evidenciaron que el tramo de muralla correspondiente a el baluarte San Pedro Mártir hasta el Baluarte la Merced relativamente se encuentra en buen estado con una resistencia promedio de la roca con problemas patológicos de 273Kg/cm<sup>2</sup> (moderadamente resistente).



La limitación de esta investigación es que no se tuvo en cuenta al momento de aplicar el ensayo de esclerómetro, parámetros o características de la roca, como su porosidad, humedad y homogeneidad; por lo que los resultados obtenidos no serían confiables.

## 1.2 ESTADO DEL ARTE

A nivel internacional se han hecho estudio a múltiples estructuras de carácter patrimonial y de importancia para la sociedad, haciendo uso de técnicas no destructivas para saber el estado en que se encuentran; algunas de estas investigaciones son:

En Argentina en el año 2007 se realizó una investigación titulada “*EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL DEL MINISTERIO DE SALUD DE LA NACIÓN*”, en este estudio y diagnóstico se presentan las patologías que afectaron a un edificio del Ministerio de Salud de la Nación, siendo la primera etapa en el proyecto de refuerzo y rehabilitación de dicho edificio. Con las propiedades mecánicas y características geométricas de la estructura, se realizó la modelación numérica tridimensional con elementos finitos. El desarrollo en el tiempo de la secuencia de patologías fue introducido como desplazamientos impuestos y redistribución de cargas en la estructura modelada, lo que permitió verificar el diagnóstico efectuado en primera instancia.

Los ensayos realizados fueron en laboratorio mediante la compresión de muestras de las unidades de mampostería (ladrillos macizos) y a tracción por compresión diametral de los testigos de mampostería. Además, la calidad del hormigón de las columnas fue evaluado mediante esclerometría, presentando una gran dispersión en las resistencias obtenidas. A fin de analizar el comportamiento de la estructura bajo cargas gravitatorias y sobrecargas de servicio y evaluar las características dinámicas de la misma, se procedió a realizar una modelación numérico computacional con los datos obtenidos en las auscultaciones



realizadas. El análisis se llevó a cabo utilizando el programa SAP 2000 versión 10.1 (CSI, 2005) de cálculo estructural basado en el método de elementos finitos.

Como conclusiones, se llega a que la modelación numérica permitió no sólo corroborar la hipótesis preliminar sino también estudiar la secuencia de daños en el tiempo de manera cualitativa y cuantitativa, como también los niveles tensionales alcanzados en las distintas etapas de asentamientos diferenciales y las consecuentes redistribuciones de cargas.

Otro estudio realizado sobre estructuras patrimoniales fue el realizado en Chile el año 2014, en la Pontificia Universidad Católica de Chile, titulado *“RESTAURACIÓN DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DE ALBAÑILERÍA EN ZONAS DE SISMICIDAD ALTA: APLICACIÓN AL MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO DE VALDIVIA, CHILE.”*, el cual consistió en un proceso que generó la propuesta de intervención estructural del MAC, que tiene por objetivo reparar y mejorar la condición actual del museo. Para este fin, se realizaron una serie de acciones, las que se pueden agrupar en 5 etapas: inspección visual, levantamiento estructural (complementado con georradar), pruebas experimentales de campo y laboratorio invasivas y no invasivas, estudio de vulnerabilidad y modelación numérica calibrada.

En cuanto a los resultados de las campañas de campo y laboratorio muestran que los materiales poseen propiedades aptas para uso estructural, niveles de corrosión aceptables y que el suelo otorga al sistema una gran rigidez lateral. Del mismo modo, se demuestra la potencialidad del uso de técnicas no invasivas de Georradar en la auscultación estructural, y que existe una excelente calibración entre el modelo desarrollado y los resultados experimentales de las campañas de micro vibraciones ambientales. La restauración contempla reparar agrietamientos, engrosar muros solicitados por cortante excesivo, reforzamiento de muros muy solicitados a flexo-compresión, anclaje de muros solicitados por esfuerzos de tracción y mejoramiento de uniones metálicas.



En el año de 2014 en la Universidad Nacional de Salta en Argentina se llevó a cabo un estudio titulado “*CONTROL DEL PROCESO DE DESHUMIDIFICACIÓN DE MUROS CON GEORRADAR. UN EDIFICIO PATRIMONIAL COMO CASO DE ESTUDIO*”, en el cual se presentan los fundamentos y los resultados obtenidos con el empleo de georradar como recurso no destructivo para controlar el sistema de deshumidificación, cuya principal ventaja es la de poder detectar en forma precoz a lo largo del tiempo alguna falla en el sistema, evitando en forma indefinida la aparición de nuevas manifestaciones patológicas por humedad ascendente. Se empleó un georradar GSSI SIR-3000 con una antena de 900 MHz, que tiene un alcance de alrededor de 1m y, por lo tanto, adecuada para los muros de la iglesia que tienen en general 0,84m de espesor. Se incorporó un odómetro a la antena, haciendo innecesario controlar la velocidad de barrido. El procesamiento de los registros tomados en la obra se realizó con el software RADAN 6.5.

Como conclusión se presenta que este tipo de ensayo es rápido para determinar el contenido volumétrico de humedad por medio de georradar. Además, Tiene una gran ventaja frente a los métodos tradicionales de medición en puntos fijos (como por ejemplo el de la resistividad) en edificios antiguos construidos con mampostería de gran inhomogeneidad y absorción variable de los materiales componentes, ya que primeramente se identifica el material cuya humedad se está analizando y así se interpreta correctamente el resultado de la medición.



## 1.3 MARCO TEORICO

### 1.3.1 Tipología de las murallas

- **Adarve.** Camino situado detrás del parapeto y en lo alto de una fortificación.
- **Baluarte.** Obra de fortificación que sobresale en el encuentro de dos cortinas o lienzos de muralla.
- **Cortina.** La parte recta y escarpada de un frente de plaza que unía dos baluartes.
- **Garita.** Torrecilla cilíndrica, pentagonal o hexagonal con aspilleras que se colocaba en los ángulos salientes de los baluartes o, en general, de las fortificaciones, para apostar centinelas.
- **Merlón.** Cada una de las partes de un parapeto que hay entre dos aberturas para disparar cañones.
- **Parapeto.** Tapia que se construía sobre el terraplén de las cortinas y como prolongación de la escarpa, hacia la parte donde se encontraba el enemigo, para proteger la artillería y las tropas.
- **Plataforma.** Parte superior de la muralla.
- **Tronera.** Ventana pequeña y angosta.

### 1.3.2 Ensayos no destructivos (END)

Se denominan END a los ensayos que tienen como objetivo la evaluación del estado de los materiales sin que queden afectadas las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los mismos y que se realizan sin producir daños que afecten a su funcionalidad. Para asegurar la correcta realización de este tipo de pruebas han de utilizarse patrones de calibración y estándares de referencia con los que comparar los resultados que se obtienen. Las principales normas o códigos de fabricación quedan recogidas en ASME, ASTM, AWS y API entre otros. Los inspectores encargados de llevar a cabo los distintos ensayos deben estar debidamente cualificados por la ASNT según niveles I, II y III acorde a los requisitos que se recogen en las normas SNT-TC-1A,



CP-189. De esta forma quedan altamente capacitados para el manejo de equipos y la realización de técnicas, además adquieren un alto conocimiento de los materiales que manejan.

Este tipo de técnicas se realizan in situ en departamentos I+D, durante el proceso de fabricación de las piezas o durante el tiempo de servicio de las mismas y se utilizan principalmente para control de calidad de materiales, piezas o estructuras. Cuando la inspección se realiza durante el proceso de manufactura se hace para evaluar su calidad y confirmar si están siendo elaborados según las normas y/o especificaciones que acrediten la calidad exigida. Para productos en servicio se realizan inspecciones periódicas, que determinan si el producto puede usarse de forma segura entre inspecciones consecutivas. Estas exploraciones son importantes para detectar, con tiempo suficiente, las modificaciones que pueden sufrir las fisuras detectadas y ver las posibilidades de reparación que pueden tener. Existe una gran cantidad y variedad de técnicas de END enfocadas a examinar los materiales utilizados para determinar la presencia, localización y tamaño de discontinuidades ya que estas pueden perjudicar la operabilidad de piezas en servicio o que sean nuevas. Entre las más comunes se encuentran la inspección visual, radiografía, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, pruebas ultrasónicas o corrientes inducidas, esclerometría, flat Jack. También existen técnicas más especializadas cuyo uso se encuentra limitado y restringido, como son las emisiones acústicas o la termografía de infrarrojo. Para seleccionar el tipo de técnica uno de los factores más determinantes es el tipo de aplicación y, en concreto, el tipo de defectos que se pueden presentar en las piezas de ensayo. De esta manera se obtienen distintas clasificaciones para las técnicas no destructivas: atendiendo al fenómeno físico en el que se basan (Tabla 1) o basada en la localización del defecto a detectar (Tabla 2).



**Tabla 1. Clasificación de END según el método físico.**

**Fuente: RAMÍREZ GÓMEZ, 1996**

<b>PRINCIPIO FISICO</b>	<b>TECNICA NO DESTRUCTIVA</b>
<b>Ópticas y colores</b>	Inspección visual, líquidos penetrantes
<b>Radiación</b>	Radiografía
<b>Electromagnetismo</b>	Partículas magnéticas, corrientes inducidas
<b>Acústicas</b>	Ultrasonidos, emisiones acústicas.
<b>Térmicos</b>	Termografía

**Tabla 2. Clasificación de END según la posición del defecto.**

**Fuente: RAMÍREZ GÓMEZ, 1996**

<b>POSICION DEL DEFECTO</b>	<b>TECNICA NO DESTRUCTIVA</b>
<b>En la superficie o cerca de ella</b>	Inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas.
<b>En el interior de los objetos</b>	Radiografía, ultrasonidos.

Independientemente de la técnica utilizada, los principales objetivos de los END son verificar la homogeneidad de los materiales, la caracterización de discontinuidades superficiales y/o internas tales como grietas o fisuras y el análisis de soldaduras o piezas fabricadas. De entre las aplicaciones que tienen los END una de las que mayor importancia ha cobrado en los últimos años es la evaluación de faltas, tanto durante el proceso de manufactura como durante la vida en servicio de las piezas, que produce un gran impacto económico. Esta deriva en un gran ahorro ya que los costos del control de calidad de los materiales examinados repercuten directamente en el costo final del producto. A raíz del efecto que tiene en la economía esta reducción de costes, debido al empleo de métodos no destructivos, se han desarrollado distintos procedimientos que



permiten proporcionar de forma fiable la localización de heterogeneidades, identificar su tipo y la cuantificación de sus dimensiones. En función de las características de las discontinuidades detectadas, quedará afectada de forma distinta la operabilidad de las piezas. Una vez caracterizada la discontinuidad y teniendo en cuenta distintos patrones de calibración y estándares de referencia de las distintas normativas se determinará si la falta detectada pone en peligro el uso de la pieza. En caso afirmativo, dicha discontinuidad se considerará un defecto de la pieza. (RAMÍREZ GÓMEZ, 1996)

### 1.3.2.1 Historia de los END

Las primeras evidencias de la aplicación de END datan de mediados del s. XIX:

- En 1868 se iniciaron trabajos con campos magnéticos.
- En 1879, el físico David Edward Hughes estableció un campo de prueba y estudió las Corrientes Inducidas o de Eddy.
- En 1895 Wilhelm Roentgen estudió el tubo de rayos catódicos descubriendo los rayos X.
- En 1896, Henri Becquerel descubrió los rayos Gamma que es una radiación electromagnética mucho más energética que la luz visible o los rayos X.

Durante el s. XX se desarrollaron otras técnicas no destructivas:

En 1900 se comenzó a usar la técnica de líquidos penetrantes con una aplicación muy concreta: el análisis de ruedas y ejes de ferrocarril para la detección de grietas superficiales. El desarrollo del método era el siguiente: las piezas se sumergían en aceite, seguidamente se limpiaban y se esparcían con polvo. En caso de existir una grieta, el aceite que previamente se había filtrado por la misma, mojaba el polvo dejando evidencia de que la pieza estaba dañada. Esta aplicación dio pie al desarrollo de esta nueva técnica con la búsqueda de nuevos aceites para mejorar la inspección de los ferrocarriles y para tener uso con otras aplicaciones. Con el avance de los procesos de producción, este método quedaba insuficiente ya que sólo revelaba la presencia de discontinuidades sin



aportar información cuantitativa sobre las mismas. Conocido el tamaño de la heterogeneidad y aplicando una serie de cálculos matemáticos concretos se puede predecir la vida útil de la pieza analizada. Estas evidencias dieron paso al comienzo de la disciplina NDE.

- En 1911 la ASTM estableció el comité de la técnica de partículas magnéticas.
- En 1928 se perfeccionó dicha técnica para su uso industrial.
- En 1930 Theodore Zuschlag patentó las Corrientes de Eddy y, tan sólo un año más tarde, apareció el primer sistema industrial de Corrientes de Eddy.
- En 1937 fue la primera vez que se utilizó la técnica ultrasónica de pulso-eco sin fines militares por parte de Sergei Sokolov. Por tanto, fue durante los años 30 que creció el uso de las pruebas por ultrasonido demostrando que las ondas ultrasónicas se reflejan tanto en defectos ocultos como en los límites de los materiales examinados.
- En 1941 aparece la técnica de líquidos fluorescentes. En ese mismo año se fundó la ASNT, actualmente la sociedad técnica de pruebas no destructivas más grande del mundo, siendo promotora de elaborar materiales educativos y de crear estándares para la calificación y certificación del personal que realiza este tipo de ensayos bajo el esquema americano.
- En 1945 el investigador estadounidense Floy Firestone comenzó a trabajar con ultrasonidos patentando el reflectoscopio supersónico que se considera como el primer detector de fallas comercial y que utilizaba la técnica pulso-eco. De esta manera, estudiando la propagación de las ondas ultrasónicas a través de materiales sólidos, se pueden detectar grietas ocultas, porosidades y otras discontinuidades internas además de utilizarse para medir el espesor del material y analizar sus propiedades.
- En 1947 el Dr. Elmer Sperry fue quien aplicó los ultrasonidos en la industria en los procesos de fabricación y durante la vida en servicio de los materiales, especialmente para analizar soldaduras y metales estructurales.



- Durante la década de 1950 diversos investigadores japoneses fueron pioneros en el uso de ultrasonidos para diagnóstico médico con el uso de equipos que proporcionaban imágenes bidimensionales.
- Entre los años 1960 y 1970 empresas punteras dedicadas a la detección de fallas (Panametrics, Staveley y Harisonic) construyeron una serie de equipos detectores y medidores para la detección de fallas con ultrasonidos. Estas empresas forman parte actualmente de Olympus NDT. También durante estos años se desarrollaron las primeras versiones de escáneres médicos para la detección de tumores y cálculos biliares. También se introdujeron los primeros medidores de espesores de precisión que también se utilizaron como medidores de corrosión en tubos metálicos y tanques.
- Desde 1980 hasta la actualidad los equipos ultrasónicos se han fundamentado en señales digitales y técnicas de procesamiento de señal, lo cual ha derivado en una nueva generación de instrumentos portátiles de pequeño tamaño y altamente fiables, para inspección que usan imágenes acústicas para detección de heterogeneidades y cálculo de espesores. (RAMÍREZ GÓMEZ, 1996)

#### 1.3.2.2 Técnicas de END más usuales

En este apartado se mencionarán los métodos de END más comunes ya que, para elegir la mejor técnica para una aplicación concreta, hay que conocer las características, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.



**Tabla 3. Aplicabilidad de las distintas técnicas de END.**

**Fuente: Ramírez, Gómez, 1996.**

<b>METODO</b>	<b>TIPO DE DEFECTOS QUE DETECTA</b>	<b>ANALIZA:</b>
<b>Radiografía</b>	Internos	Soldaduras y fundiciones
<b>Ultrasonidos</b>	Internos	Placas, tuberías, Soldaduras y forjados
<b>Líquidos penetrantes</b>	Superficiales	Materiales metálicos y no metálicos
<b>Flat Jack</b>	Superficiales e internos	Rocas, placas.
<b>Esclerómetro</b>	Internos	Resistencia de hormigón y rocas.

En la Tabla 3 se muestra un pequeño esquema sobre los distintos métodos y, a continuación, se describirán más en detalle, haciendo más énfasis en los que se utilizarán en esta propuesta (flat Jack, esclerometría, ultrasonidos).

#### 1.3.2.2.1 Radiografía

El ensayo radiográfico es un método no destructivo para buscar defectos internos en piezas u objetos y se fundamenta en la capacidad de penetración de los rayos X o de los rayos Gamma en los distintos materiales en función de su naturaleza y espesor. El material se irradia y, en caso de existir heterogeneidades, presenta cambios internos que hacen que se retenga la radiación. Colocando una película radiográfica se obtienen cambios de tonalidad en las zonas donde se recibe radiación.



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



Es una buena técnica para la detección de defectos volumétricos que tengan un volumen superior al 3 % relativo al espesor del material en la dirección de los rayos incidentes.

Las ventajas de este método son:

- Es un método muy sensible y proporciona una imagen en película pudiéndose conservar como evidencia objetiva de la presencia o no de defectos.

Como desventajas:

- Es un método peligroso ya que el operador se expone a la radiación.

- Debido al uso de materiales radiactivos se necesita un permiso especial para su realización además de detectores de radiación para asegurar la integridad y salud de los inspectores.

- Los inspectores encargados han de tener conocimiento sobre tratamiento de imágenes.

#### 1.3.2.2.2 Líquidos penetrantes

La técnica de líquidos penetrantes se emplea para detectar defectos superficiales en los materiales examinados tales como roturas, pliegues, inclusiones o porosidades. Para realizar dicho ensayo se ha de seguir un protocolo bien establecido cuyos pasos concretos son los siguientes:

- Limpieza inicial: Antes de comenzar el ensayo se ha de limpiar la superficie de la pieza para dejarla libre de agentes contaminantes.
- Penetración: Se aplica sobre la superficie un líquido penetrante que suele ser de color rojo de alta capilaridad que penetra en el material en caso de existir defectos. También pueden usarse penetrantes fluorescentes. A continuación, se deja secar la pieza entre 15 y 20 minutos.



- Limpieza intermedia: Se elimina el exceso de líquido penetrante con ayuda de un líquido eliminador que se impregna en un papel. Con dicho papel se frota la superficie de la pieza.
- Revelado: Se aplica un líquido revelador de color blanco que tiene una gran capacidad de absorción. Dicho líquido absorbe el líquido penetrante que ha quedado en el interior de las discontinuidades quedando el revelador manchado de rojo en las zonas con defectos.
- Observación: A simple vista se pueden observar las indicaciones de los defectos con luz natural si los penetrantes son de color o con luz negra si se utilizan penetrantes fluorescentes.
- Limpieza final: Cuando se concluye el ensayo se debe limpiar la pieza totalmente.

Las principales ventajas de este método es que es fácil de llevar a cabo, muy preciso y muy sencillo de interpretar. Como desventaja se puede indicar que no se puede aplicar para materiales demasiado porosos. (O. DUDA, & E. HART, 1973)

#### 1.3.2.2.3 Esclerometría

Ideado en un principio para estimar la resistencia a compresión simple del concreto, el martillo de Schmidt se ha modificado convenientemente dando lugar a varios modelos, alguno de los cuales resulta apropiado para estimar la resistencia a compresión simple de la roca (RCS). Su uso es muy frecuente dada la manejabilidad del aparato, pudiendo aplicarse sobre roca matriz y sobre las discontinuidades (resistencia de los labios). El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada. La medida del rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico debido a Miller (1965) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado.



#### 1.3.2.2.3.1 Tipos de martillo

En la práctica común se utilizan dos tipos de martillo, el tipo L con una energía de impacto de 0.735 N.m y el tipo N con una energía de impacto de 2.207 N.m. Los rebotes medidos con estos martillos se denotan con los símbolos RL y RN, respectivamente.

Ambos martillos proporcionan buenos resultados para valores de compresión simple de la roca o la discontinuidad ensayada dentro del rango 20-150 MPa.

Previamente al año 2009, ISRM recomendaba únicamente el martillo de tipo L; ahora los dos están permitidos (Aydin 2009). El martillo tipo N se usaba mayoritariamente para concreto. Sin embargo, es menos sensible a las irregularidades de la superficie ensayada y sería por tanto preferible para la realización de ensayos de campo. La norma ASTM no especifica el tipo de martillo.

Ayday y Göktan (1992) obtuvieron, de acuerdo al procedimiento de toma de datos sugerida por la recomendación ISRM (1978c), la siguiente correlación empírica entre los números de rebotes de ambos martillos:

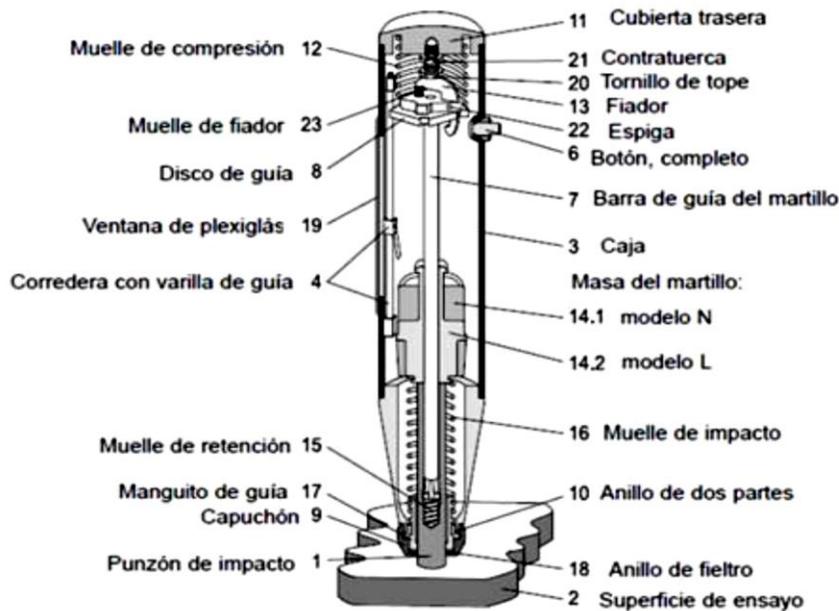
$$RN = 7.124 + 1.249$$

$$RL (r^2 = 0.882)$$

Siendo RN y RL el número de rebotes proporcionado por un martillo tipo N y L, respectivamente; y  $r^2$ , el coeficiente de determinación lineal.

#### 1.3.2.2.3.2 Descripción y principio de funcionamiento

El martillo de Schmidt (Figura 1) es un dispositivo mecánico usado para realizar ensayos no destructivos en materiales como el concreto o roca.

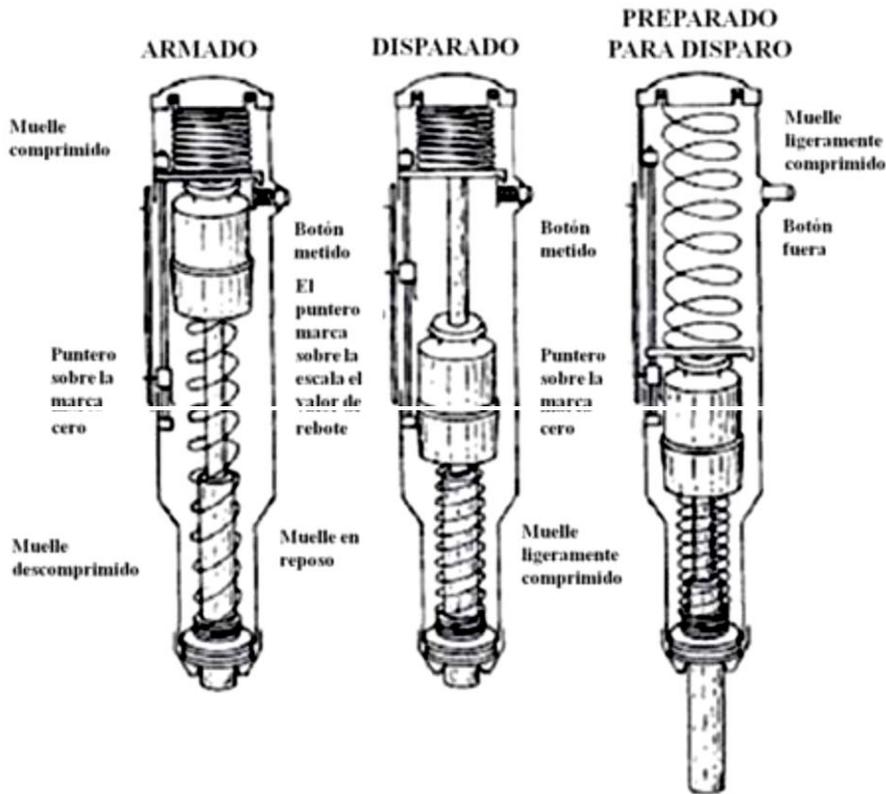


**Figura 1. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes.**

**Fuente: Equipos olson**

Consiste básicamente en un vástago que lleva conectado un muelle. Se coloca el vástago sobre la roca y se introduce en el martillo empujándolo contra la roca, lo que da lugar a que se almacene energía en el muelle que se libera automáticamente cuando esa energía elástica alcanza un cierto nivel y lanza una masa contra el vástago.

La altura que alcanza esta masa al rebotar, que se mide en una escala graduada de 0 a 100, es directamente proporcional a la dureza y por tanto a la resistencia a compresión simple de la superficie de la roca (Fig. 2).



**Figura 2. Principio de funcionamiento del martillo.**

**Fuente: Equipos Olson**

### 1.3.2.2.3.3 Procedimiento de medida

El martillo únicamente se debe usar en las superficies de los materiales a ensayar y en el yunque de prueba. En el caso de ensayos in situ, el desarrollo del ensayo consiste en una preparación de las zonas elegidas, eliminando la pátina de roca meteorizada. Para alisar la superficie de ensayo se utiliza una piedra de amolar (Figura 3).



**Figura 3. Preparación de la superficie de ensayo.**

**Fuente: Equipos Olson**

Para la ejecución del ensayo, se realizan los siguientes pasos:

- Posicionar el martillo perpendicularmente a la superficie de la roca ensayada.
- Disparar el vástago o punzón de impacto [1] empujando el martillo hacia la superficie de ensayo hasta que el botón [6] salte hacia fuera (Figura 4).
- Pulsar el botón para bloquear el vástago de impacto después de cada impacto.
- A continuación, leer y anotar el valor de rebote indicado por el puntero [4] en la escala [19].



**Figura 4. Ejecución del ensayo.**

**Fuente: Equipos Olson**



Para la realización de ensayos sobre testigos de roca obtenidas en la perforación de sondeos se utiliza una base especial de acero (Figura 5), de 20 kg de peso para los ensayos con martillo tipo L, sobre la que se apoya la probeta de roca cilíndrica de diámetro mínimo 54 mm (NX) y longitud superior a 100 mm (ISRM). Para los ensayos con martillo tipo N, ISRM sugiere un diámetro igual o superior a 84 mm (T2) y que la base tenga un peso de 40 kg.

Para calibrar el martillo se utiliza un yunque de prueba. Se recomienda realizar esta prueba de funcionamiento cada vez que se utilice el dispositivo. Si no se dispone del yunque de prueba se recomienda enviarlo al fabricante para su chequeo después de realizar 1000 impactos o cada 3 meses.



**Figura 5. Soporte para testigos de roca.**

Para la ejecución de la prueba de funcionamiento se deben realizar los siguientes pasos:

- Colocar el yunque de prueba (Figura 6) en una superficie dura y lisa.
- Limpiar las superficies de contacto del yunque y del vástago de impacto.
- Ejecutar 10 impactos con el martillo y comprobar los resultados comparándolos con el valor de calibración especificado en el yunque de prueba.



**Figura 6. Yunque de prueba.**

**Fuente: Aydin, 2009.**

El factor de corrección (FC) se debe aplicar a todas las lecturas obtenidas en los ensayos y se calcula como:

$$FC = \frac{\text{Valor de calibración del yunque de prueba}}{\text{Promedio de los diez impactos sobre el yunque}}$$

**Ecuación 1. Factor de corrección.**

De esta manera se tiene en cuenta la pérdida de rigidez del muelle del martillo con el paso del tiempo.

Mediante el martillo de Schmidt, o esclerómetro, se puede, por tanto, estimar la resistencia a compresión simple de la roca a partir de la resistencia al rebote de la superficie de roca ensayada. Como se ha comentado anteriormente, esta superficie deberá estar fresca y limpia, sin ningún signo de alteración ni fracturas. Esta medida del rebote se correlaciona con la



resistencia mediante el gráfico de Miller (Figura 7) que tiene en cuenta la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al plano de roca ensayado. (AYDIN, 2009)

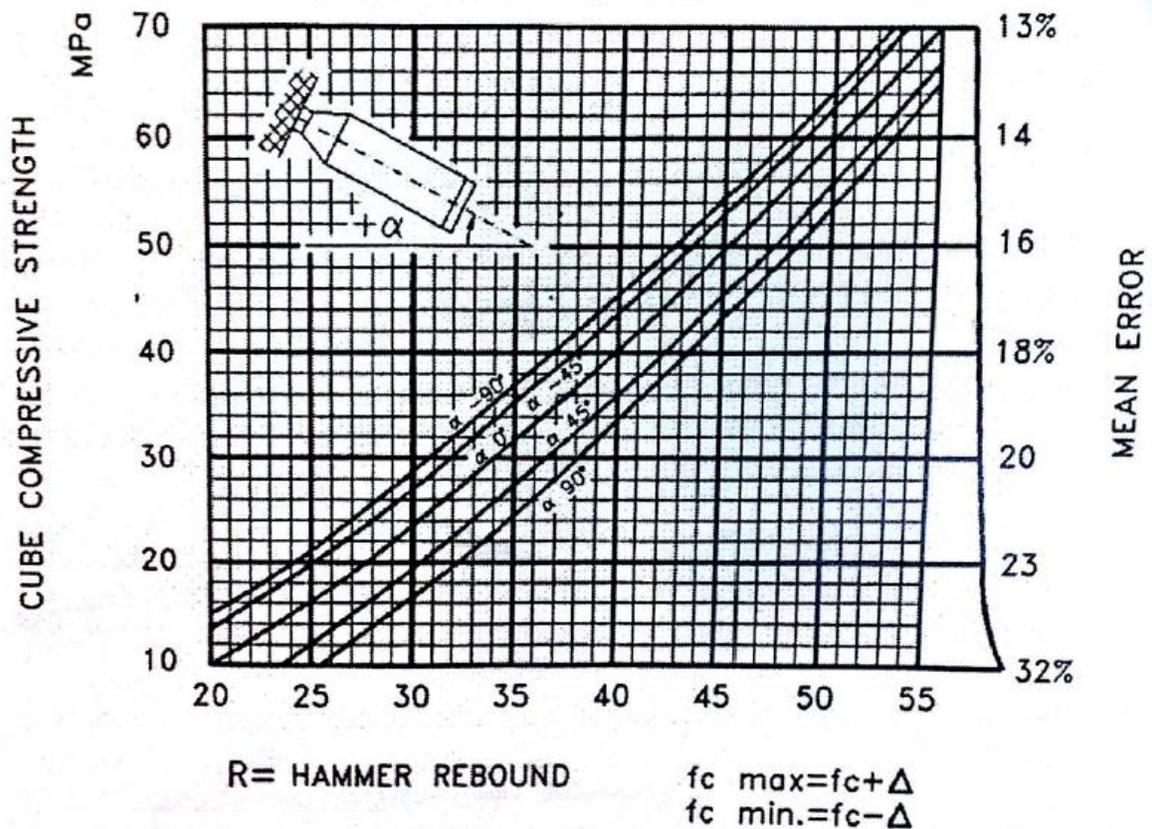


Figura 7. Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión y rebote

Fuente: Miller, 1965

El valor estimado a partir del martillo de Schmidt debe ser obtenido estadísticamente, de tal manera que sea un valor representativo.

ISRM recomienda tomar 20 lecturas en diferentes zonas con la opción de parar cuando alguna de las lecturas siguientes a las diez primeras difiera de la inmediatamente anterior un máximo de 4 golpes. La norma ASTM recomienda tomar 10 lecturas.

ISRM (1978c) sugiere utilizar el promedio de las diez lecturas con valores más altos. La ASTM recomienda descartar las lecturas que difieran más de 7 golpes del promedio y



después promediar las restantes. La ISRM revisada sugiere no descartar ninguna lectura y presentar los valores obtenidos mediante un histograma de frecuencias que incluya el promedio, mediana, moda y el rango.

Con el valor medio obtenido y conociendo la densidad de la roca se entra en el gráfico de Miller, obteniéndose el valor de resistencia a compresión para el material ensayado.

Con los valores obtenidos se puede clasificar la roca por su resistencia (tabla 4).

**Tabla 4. Clasificación de la resistencia según la ISRM.**

**Fuente: Aydin, 2009.**

<b>DESCRIPCION</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESION</b> <i>(kg/cm<sup>2</sup>)</i>
<b>Muy débiles</b>	< 70
<b>Débiles</b>	70-200
<b>Moderadamente resistentes</b>	200-700
<b>Fuertes</b>	700-1400
<b>Muy fuertes</b>	>1400

La siguiente tabla (tabla 5) muestra valores típicos medidos en diferentes tipos de roca con un martillo Schmidt tipo L.



**Tabla 5. Valores típicos de número de rebotes medidos con martillo tipo L para diferentes rocas.**

**Fuente: Aydin, 2009.**

<b>TIPO DE ROCA</b>	<b>RL</b>
<b>Andesita 2852</b>	28-52
<b>Arenisca</b>	30-47
<b>Basalto</b>	35-58
<b>Caliza</b>	16-59
<b>Creta</b>	10-29
<b>Cuarcita</b>	39
<b>Diabasa</b>	36-59
<b>Dolomía</b>	40-60
<b>Esquisto</b>	29-41
<b>Gabro</b>	49
<b>Gneiss</b>	48
<b>Granito</b>	45-56
<b>Limolita</b>	47
<b>Lutita</b>	15
<b>Marga</b>	18-39
<b>Mármol</b>	31-47
<b>Peridotita</b>	45
<b>Prasinita</b>	41
<b>Sal</b>	23
<b>Serpentinita</b>	45
<b>Toba</b>	13-40
<b>Yeso</b>	30-44

Igualmente, mediante la aplicación del martillo de Schmidt tipo L sobre una discontinuidad se puede obtener la resistencia a compresión simple de los labios de la discontinuidad (JCS). En este caso, se indicará expresamente que son valores de resistencia medidos sobre la superficie de la discontinuidad.

En general, el valor de JCS que se obtenga para una determinada discontinuidad deberá ser inferior a la resistencia a compresión simple de la roca sana, de forma que en general se podrá estimar JCS como la resistencia a compresión simple del material sano dividida entre una constante que se aproximará a 2.5 para rocas densas, a 5 para rocas intermedias y que llegará a 10 para el caso de rocas porosas. (*STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINATION OF ROCK HARDNESS BY REBOUND HAMMER METHOD*, 2005)



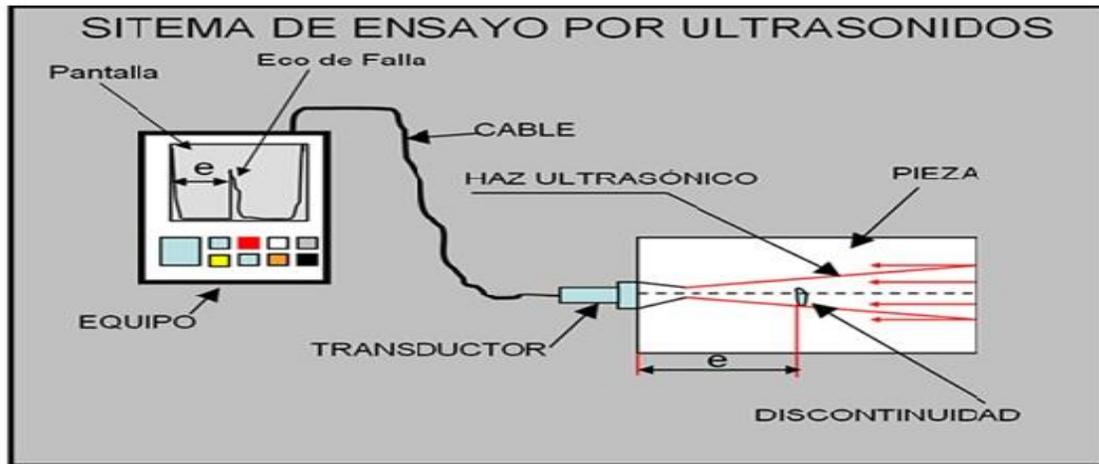
#### 1.3.2.2.4 Ultrasonidos

Es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y sub-superficie.

Las ondas de sonido viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades.

El grado de reflexión depende grandemente en el estado físico de los materiales que forman la interface. Por ejemplo: las ondas de sonido son reflejadas casi totalmente en las interfaces gas/metal. Por otro lado, existe una reflectividad parcial en las interfaces metal/sólido.

Grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades que producen interfaces reflectivas pueden ser detectadas fácilmente. Inclusiones y otras partículas extrañas pueden ser también detectadas causando baja reflexión.



**Figura 8. Sistema de ensayo por ultrasonido.**

**Fuente: Dekker, 2002.**

La mayoría de los instrumentos de inspección ultrasónica detectan fallas monitoreando uno más de los siguientes puntos:

- La reflexión del sonido de las interfaces consistentes en los límites del material o en discontinuidades dentro del material mismo.
- El tiempo de tránsito de la onda de sonido durante la prueba dentro de la pieza desde el punto de entrada del transductor hasta el punto de salida.
- La atenuación de las ondas de sonido en la pieza debido a la absorción y dispersión dentro de la pieza. La mayoría de las inspecciones ultrasónicas son realizadas en frecuencias entre 0.1 y 25 MHz.

Las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas, las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producirán deformaciones plásticas.



La inspección ultrasónica es el método no destructivo más comúnmente utilizado. Su principal aplicación es la detección de discontinuidades y defectos internos, aunque también es utilizado para detectar defectos superficiales, para definir características de la superficie tales como: medida de corrosión y espesor. Y con frecuencias menores se sirve para determinar el tamaño de grano, estructura, y constantes elásticas.

#### 1.3.2.2.4.1 Equipo básico

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.
- Un transductor (puede ser el mismo que el transductor que inicia las ondas ultrasónicas o puede ser otro diferente) para aceptar y convertir las ondas de ultrasonido de salida de la pieza de trabajo en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.
- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.



#### 1.3.2.2.4.2 Características generales de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas (en contraste por ejemplo con los rayos x que son ondas electromagnéticas) que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Las ondas de ultrasonido se comportan igual que las ondas de sonido audible. Se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío.

En varios aspectos, un haz de ultrasonido es similar a un haz de luz, ambos son ondas y obedecen a la ecuación general de ondas. Cada onda viaja con características diferentes las cuales dependen del medio en el que se propaguen no de las características de la onda. Como un haz de luz, un haz de ultrasonido es reflejado de las superficies, refractado cuando cruza las fronteras entre dos sustancias que tienen diferentes características de velocidades y difractados en los bordes o alrededor de los obstáculos.

#### 1.3.2.2.4.3 Métodos básicos de inspección

Los dos métodos más importantes para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método eco-pulsado. La principal diferencia entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método eco-pulsado puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal.

##### 1.3.2.2.4.3.1 Método Sonic Echo.

El sistema está diseñado para determinar la longitud y la integridad de los cimientos cuando se puede acceder a la parte superior o parte de la parte superior de la cimentación. Este



sistema y su metodología asociada se pueden utilizar tanto en cimentaciones nuevas como existentes y se realizan impactando la cimentación y grabando los ecos de un defecto o la base de la cimentación con un receptor cercano. Se debe tener en cuenta que este método funciona mejor para cimientos tipo columna, como pilas y pozos perforados, pero también se ha utilizado con éxito en cimientos de muros, muros de pilares y estructuras similares. Esta técnica es aplicable en cimientos de tuberías de acero, hormigón y madera.

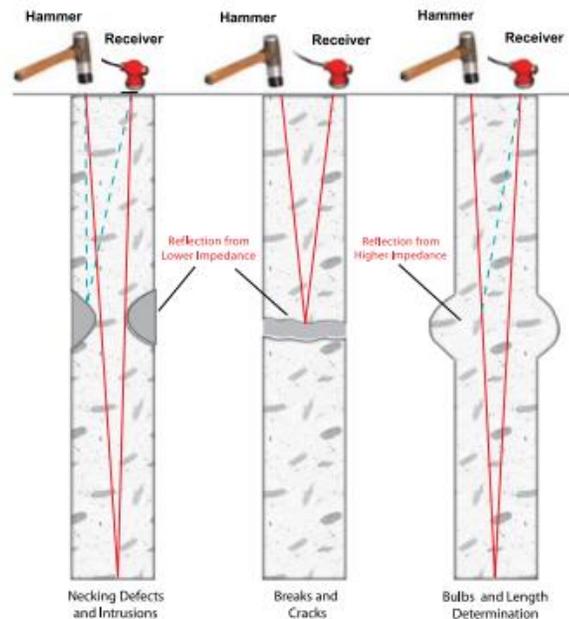
El método Sonic Echo (SE) normalmente se realiza junto con el método Impulse Response (IR) junto con el método SE / IR. Olson, sin embargo, proporciona un sistema que utiliza exclusivamente la metodología SE sin los análisis IR. Este sistema, junto con su software asociado, usa solo la información de dominio de tiempo en los datos para la interpretación de reflexiones. La opción IR proporciona al usuario la capacidad de transformar los datos del dominio de tiempo en el dominio de frecuencia. Luego, el software calcula automáticamente las funciones de transferencia y coherencia, que pueden ser útiles para el análisis de la calidad de los datos, así como para proporcionar más información sobre las reflexiones dentro de la estructura.

Características:

- El diseño del sistema permite mediciones de campo rápidas y precisas
- Visualización de forma de onda en tiempo real mientras se prueba
- El sistema es compacto, duradero y fácil de transportar, lo que permite múltiples pruebas por día.
- Exacto dentro del 5% para determinar la profundidad de la base
- Integrar y promediar los datos de aceleración y respuesta de velocidad a la velocidad en las pruebas SE para una mejor identificación de los ecos.
- Amplifica exponencialmente los datos SE con el tiempo para mejorar los ecos débiles con muestreo de A / D de 16 bits
- Filtrado digital de datos SE con opciones de paso bajo, paso alto y paso de banda para mejorar la identificación de eventos de eco y minimizar el ruido de fondo



- Visualización de la función de transferencia de movilidad IR (velocidad / fuerza frente a frecuencia) de los resultados de IR para identificar picos resonantes indicativos de profundidades de eco y movilidad promedio.



**Figura 9. Transmisión de la onda**

**Fuente: Equipos Olson.**

#### 1.3.2.2.4.3.2 Método Impact Echo.

Los sistemas están diseñados para determinar la condición y el grosor de los elementos estructurales de hormigón, madera, piedra y mampostería cuando se sospechan huecos, nidos de abeja y / o grietas. Las investigaciones de IE también se pueden realizar para predecir la resistencia del hormigón a edades tempranas si se conoce el grosor del miembro. Por último, el método IE proporcionará información sobre la profundidad de un defecto o defecto, además de mapear su ubicación y extensión lateral. Una ventaja del método IE sobre el método de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) es que solo un lado de la estructura debe ser accesible para la prueba.



#### Características:

- Solución económica para usuarios que ya poseen una PC Freedom Data o una NDE 360
- Precisión de espesor  $\pm 2\%$  a alta resolución cuando se calibra en un espesor conocido
- Guarda el tiempo de prueba seleccionado / la fecha y los resultados del espesor espectral para una revisión posterior
- Se pueden usar unidades inglesas o métricas
- Fácil calibración de velocidad en una ubicación de espesor conocido
- El sistema es compacto, duradero y fácil de transportar, lo que permite múltiples pruebas por día.
- Visualización de forma de onda en tiempo real mientras se prueba.

En las investigaciones convencionales de IE, el martillo o impactador se usa para generar ondas de compresión que se reflejan desde la parte inferior del miembro probado o desde una discontinuidad. La respuesta del sistema se mide luego por el receptor colocado al lado del punto de impacto. Solo se debe tener acceso a una superficie relativamente lisa y limpia para la colocación del receptor y el impacto de martillo o solenoide.

#### 1.3.2.2.4.3.3 Método Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Los sistemas están diseñados para identificar y mapear huecos, nidos de abeja, grietas, delaminaciones y otros daños en concreto, madera, mampostería, piedra, cerámica y materiales metálicos. Las pruebas de UPV también se realizan para predecir la fuerza del hormigón a una edad temprana. La metodología UPV se basa en la llegada directa de ondas compresionales, que son generadas por fuentes con frecuencias de resonancia que van desde 50 hasta 150 kHz. Las fuentes / receptores de frecuencia de resonancia más alta se usan típicamente con elementos estructurales más delgados para una resolución más alta y una identificación de anomalías más pequeña. La prueba se realiza colocando la fuente y el receptor en cualquier lado del área en cuestión, luego la fuente envía una onda de compresión



a través de la región, y el receptor registra la forma de onda completa en el otro lado. La posición de los dos transductores puede variarse de forma que se puedan realizar pruebas directas, semidirectas e indirectas, lo que ayuda a mapear el volumen del defecto. Se pueden realizar más pruebas si el usuario desea generar una representación tridimensional del volumen en cuestión. Esto se hace probando muchas "rutas" diferentes a través del medio y luego usando un programa de inversión tomográfica para generar un modelo.

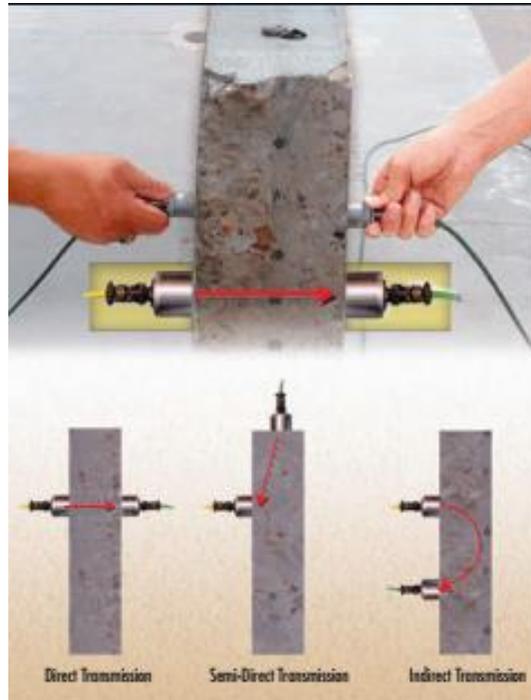
#### Características:

- Impermeable ~ 50 kHz transductores UPV estándar
- Curva de aprendizaje corta para adquisición de datos y procesamiento básico
- Visualización de forma de onda en tiempo real mientras se prueba
- El sistema es compacto, duradero y fácil de transportar, lo que permite múltiples pruebas por día
- Los mapas en 2-D se generan fácilmente a partir de datos al exportar las tablas de WinTFS a Excel
- Las imágenes de velocidad tomográfica se pueden generar a partir de estos datos, proporcionando al usuario una herramienta visual bidimensional o tridimensional de la región en cuestión
- Se pueden usar unidades inglesas o métricas
- El sistema incluye una barra de calibración según ASTM y otras normas.

La prueba de UPV convencional requiere acceso a dos superficies, preferiblemente dos superficies paralelas tales como las superficies superior e inferior de una losa o las superficies interior y exterior de una pared. Sin embargo, esta prueba se puede realizar utilizando el método indirecto que no requiere acceso a dos superficies. En las áreas de defectos, la velocidad de la onda de compresión es más lenta que en las áreas de sonido y la amplitud de la señal es a menudo menor. Para miembros estructurales que contienen vacíos grandes y severos, la transmisión de señal puede perderse por completo. En algunas áreas defectuosas, como los paneles, la velocidad de la onda de compresión puede ser casi la misma que en las



áreas de sonido, pero la distorsión de la señal (filtrado de altas frecuencias) puede usarse como una indicación de un defecto de nido de abeja.



**Figura 10. Aplicación del ensayo UPV**

**Fuente: Equipos Olson.**



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar y diagnosticar el estado actual de las murallas desde el punto de vista estructural y funcional, mediante la implementación de técnicas no destructivas, con el fin de verificar la confiabilidad de estas técnicas y preservar el patrimonio histórico de la ciudad de Cartagena de Indias.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar cuáles son los parámetros físicos y químicos que influyen en las técnicas no destructivas a implementar.
- Realizar ensayos no destructivos para determinar las características mecánicas de la estructura.
- Recomendar una propuesta de intervención para el mantenimiento del Baluarte de Santo Domingo en caso de encontrar problemas.
- Comparar los datos obtenidos de la resistencia de la roca en otras investigaciones con los de esta investigación para tener en cuenta si hay ciertas variaciones significativas.

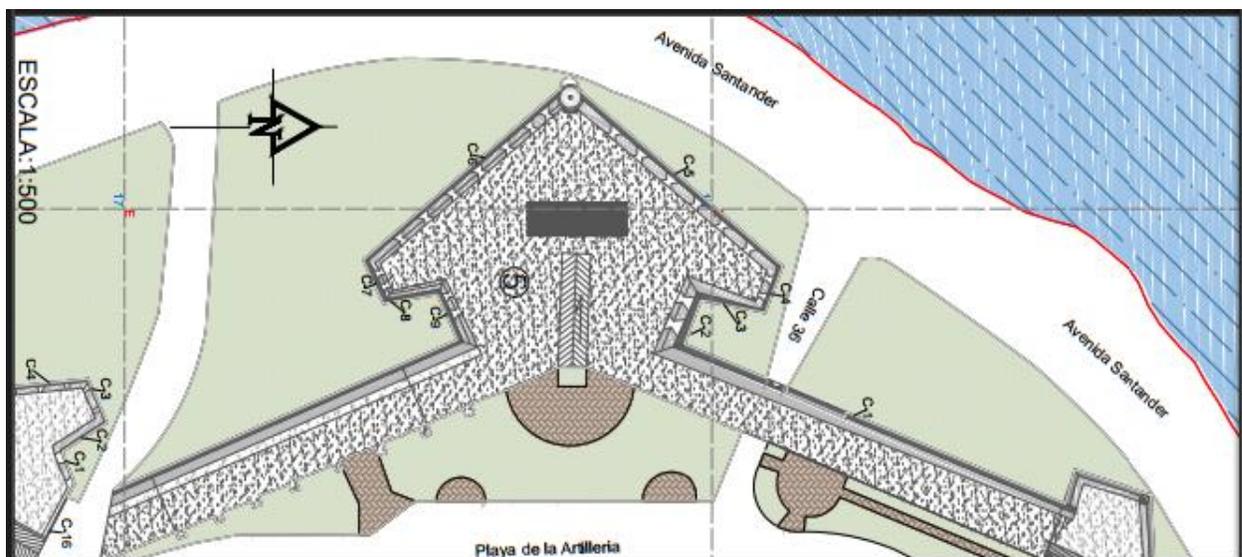


### 3. ALCANCE

Este estudio se realizará con el objetivo de saber cuáles son las condiciones en que se encuentra el cordón amurallado circundante al baluarte de Santo Domingo y este mismo, por medio de ensayos no destructivos, y de esta manera proponer soluciones para un mejoramiento en caso de que se encuentren problemas en la estructura.

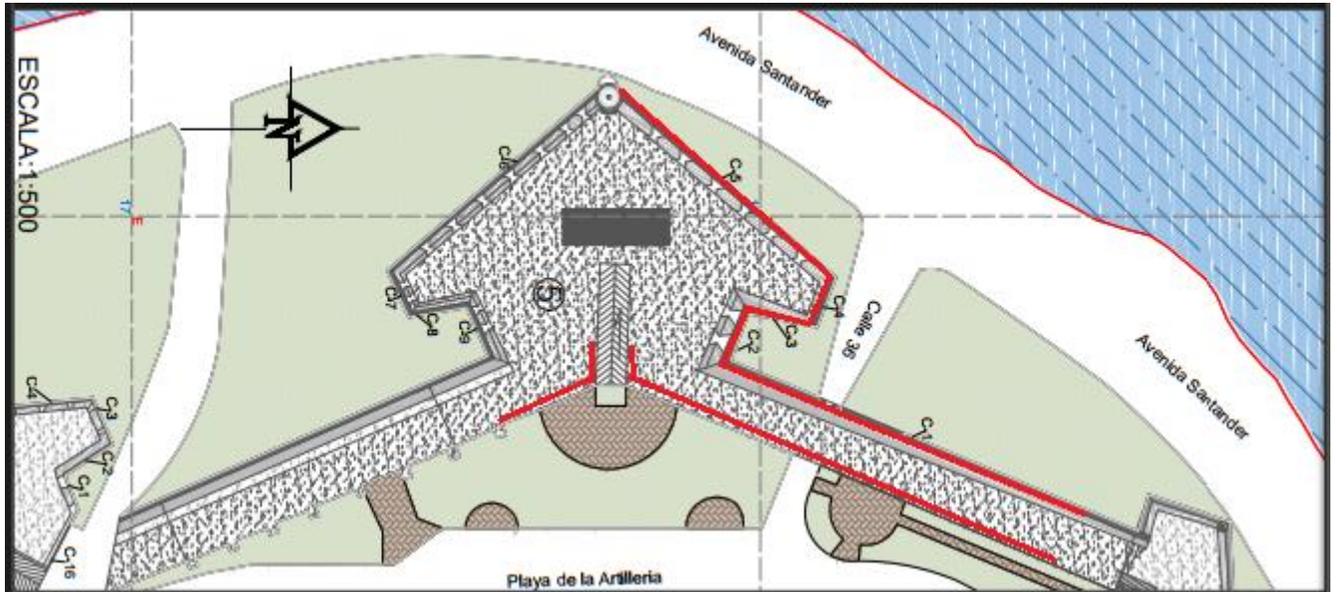
#### 3.1 DELIMITACION ESPACIAL

Los ensayos no destructivos a aplicar serán en las murallas de Cartagena, específicamente en el Baluarte de Santo Domingo, ubicado en las coordenadas  $10^{\circ} 25' 28.0302''$  N  $75^{\circ} 33' 14.2128''$  W.



**Figura 11. Vista aérea Baluarte Santo Domingo en Cartagena de Indias.**

**Fuente: Escuela taller.**



**Figura 12. Tramo del cordón amurallado estudiado.**

**Fuente: Escuela taller.**

### **3.2 DELIMITACION TEMPORAL**

Se prevé desarrollar el proyecto en el segundo periodo académico del año 2017, con una duración aproximada de 10 semanas.

### **3.3 DELIMITACION CONCEPTUAL**

En este estudio se busca determinar el estado actual del cordón amurallado de Cartagena de Indias, en específico el tramo comprendido entre el Baluarte de Santa Cruz y el Baluarte de Santo Domingo, y además el estado de este último, por medio de técnicas no destructivas, puesto que los ensayos de tipo destructivo no pueden ser aplicados en éste por pertenecer al patrimonio de la ciudad; los ensayos a aplicar serán el esclerómetro de Schmidt y ultrasonido.



Con los ensayos realizados se obtendrán parámetros de resistencia del cordón amurallado circundante al baluarte y de este, como lo son la compresión, y por medio de un análisis detallado de los resultados se podrá determinar si es necesaria una intervención futura en caso de encontrarse problemas en la estructura.

### **3.4 LIMITACIONES Y/O EXCEPCIONES**

Debido a que las murallas de Cartagena son un patrimonio cultural de la ciudad, las intervenciones que se pueden hacer a esta solo deberán ser con mínimos daños, es decir solo aplicar ensayos no destructivos.

En este estudio solo se realizarán dos ensayos no destructivos al cordón amurallado entre el Baluarte de Santa Cruz y el Baluarte Santo Domingo, los cuales son el ensayo de esclerometría y ultrasonido, debido que para realizar otros tipos de ensayos es necesario la adquisición de ciertos equipos que no se encuentran en el país.



#### 4. METODOLOGIA

El proyecto investigativo “EVALUACIÓN, DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL A LAS MURALLAS DE CARTAGENA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y DETERMINANDO LA CONFIABILIDAD DE ÉSTAS: SECTOR BALUARTE DE SANTO DOMINGO.” es una investigación mixta, la cual tiene dos etapas, la primera es de campo y la segunda es analítica o de intervención:

**Etapas de Campo:** En esta primera etapa se buscó conocer el estado actual de la muralla de Cartagena de Indias sector Baluarte de Santo Domingo. Se analizaron los componentes estructurales tales como resistencia e integridad de la cortina que va desde el Baluarte Santo Domingo hasta el Baluarte Santa Cruz por medio de ensayos no destructivos, los cuales fueron esclerometría y ultrasonido. Además, se tomaron pequeñas muestras, esto con el fin de determinar factores como la humedad y la temperatura en el punto de aplicación del ensayo, también se identificaron visual y fotográficamente los daños que presenta la muralla en su superficie.

**Etapas Analíticas:** En esta segunda etapa se tomó la información obtenida en el campo, se llevó a cabo una serie de análisis con base en los manuales guías y fuentes bibliográficas, para así dar conocimiento sobre las patologías y el estado actual en que se encuentra la muralla en el sector Baluarte de Santo Domingo en cuanto a su resistencia e integridad y las posibles intervenciones viables. En esta etapa analítica nos pudimos dar cuenta de que la roca que están reemplazando es mucho más resistente a la original, esto fue comprobado por medio de datos obtenidos en campo.



## 4.1 INFORMACION PRIMARIA Y SECUNDARIA

La información primaria de la investigación correspondió a los datos recolectados por el investigador y el equipo de apoyo in-situ: ensayos realizados e inspección visual.

La información secundaria de la investigación correspondió a los manuales conseguidos, anexando el plano de la muralla del sector Baluarte de Santo Domingo en donde se muestra como está constituida, el cual fue proporcionado por la escuela taller.

Éste trabajo contó con una metodología propuesta para alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, el cumplimiento de los mismos estuvo regido por una serie de etapas:

### 4.1.1 Recolección de información relacionada a la investigación

**Resistencia e integridad estructural:** Los datos de resistencia de la roca se obtuvieron con la ayuda de un esclerómetro y equipos de ultrasonido, con el equipo de esclerómetro se ubicaron 8 puntos en la cortina que va desde el Baluarte de Santo Domingo hasta el Baluarte Santa Cruz, en cada punto se tomaron 15 lecturas, para luego hacer un promedio de los datos y tener un resultado más confiable.



**Figura 13. Esclerómetro Smichdt**

**Fuente: Autores**

Con el equipo de ultrasonido se utilizó el Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).



Con la tecnología Ultrasonic Pulse Velocity se pudo evaluar la resistencia mecánica de la roca en 8 puntos distintos ubicados en la escarpa y la contraescarpa de la muralla, cabe destacar que esta tecnología solo pudo aplicarse de manera indirecta y semidirecta, debido a la porosidad de la muralla no pudo aplicarse de manera directa porque la onda generada por el equipo se distorsionaba.



**Figura 14. Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)**

**Fuente: Equipos Olson.**

**Toma de muestras (determinación de temperatura y humedad):** Las muestras tomadas se sacaron con el acompañamiento de la escuela taller, se tomaron un total de 8 muestras las cuales fueron posteriormente pesadas e introducidas en un horno, después fueron sacadas al día siguiente durante un tiempo aproximado de 24 horas, y luego fueron nuevamente pesadas, todo esto se realizó en el laboratorio de la Universidad de Cartagena, esto con la finalidad de determinar la humedad. Para el caso de la temperatura, ésta se obtuvo mediante el centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas que el día 24 de octubre de 2017 estaba en 31°C.

**Análisis de resultados:** Por último, se realizaron los respectivos análisis con base en todo lo mencionado anteriormente, se identificó y evaluó la resistencia e integridad de la muralla en ese sector, el estado en que se encuentra según los manuales y las posibles soluciones viables al momento de una intervención.



**Planos:** Los planos de la parte de la muralla analizada fueron brindados por la escuela taller, para así poder identificar los puntos donde se llevaron a cabo los ensayos y realizar el respectivo registro del diagnóstico para la fecha en que se realizaron cada uno de los distintos estudios mencionados anteriormente.



## 5. RESULTADOS

Después de llevar a cabo la metodología antes descrita se pudo obtener los resultados que competen a la resistencia e integridad de la muralla de Cartagena de Indias que está entre el baluarte Santo Domingo y el baluarte Santa Cruz, se hizo una recomendación para las posibles intervenciones a futuro de acuerdo a los estudios realizados.

### 5.1 DETERMINACION DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

Para la determinación de humedad y temperatura se tomaron 8 muestras in situ de la cortina de la muralla que va desde el baluarte Santo Domingo hasta el baluarte Santa Cruz.

En la siguiente tabla se muestran los pesos antes de ser secadas en el horno de cada una de las muestras obtenidas:

**Tabla 6. Peso húmedo**

**Fuente: Autores**

<b>Muestras</b>	<b>Peso húmedo (g)</b>
<b>1</b>	144
<b>2</b>	91.4
<b>3</b>	205.5
<b>4</b>	37.4
<b>5</b>	65
<b>6</b>	117.3
<b>7</b>	77.2
<b>8</b>	125.2



En la siguiente tabla se muestran los pesos de las muestras luego de ser secadas en el horno por 24 horas:

**Tabla 7. Peso seco**

**Fuente: Autores**

<b>Muestras</b>	<b>Peso seco (g)</b>
<b>1</b>	142.3
<b>2</b>	89.3
<b>3</b>	185.5
<b>4</b>	35.9
<b>5</b>	64.3
<b>6</b>	105.5
<b>7</b>	69.1
<b>8</b>	119.1

Luego de tener los pesos de las muestras antes y después de ser llevadas al horno se pudo obtener la humedad natural la cual se muestra en la siguiente tabla:



**Tabla 8. Humedad natural**

**Fuente: Autores**

<b>Muestra</b>	<b>Peso húmedo (g)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso del agua (g)</b>	<b>Humedad natural (%)</b>
<b>1</b>	144	142.3	1.7	1.2
<b>2</b>	91.4	89.3	2.1	2.3
<b>3</b>	205.5	183.5	22	10.7
<b>4</b>	37.4	35.9	1.5	4
<b>5</b>	65	64.3	0.7	1.1
<b>6</b>	117.3	105.5	11.8	10.1
<b>7</b>	77.2	69.1	8.1	10.5
<b>8</b>	125.2	119.1	6.1	4.9

Para el caso de la temperatura, ésta se obtuvo mediante el centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas que el día 24 de octubre de 2017, día en que se realizaron los distintos ensayos, estaba en 31°C.

## **5.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos los cuales se aplicaron para conocer la resistencia mecánica actual de la muralla que va desde el baluarte Santo Domingo hasta el baluarte Santa Cruz.



### 5.2.1 Esclerómetro

Se realizaron los ensayos en 8 puntos distintos en la cortina de la muralla que va desde el Baluarte Santo Domingo hasta el baluarte Santa Cruz como está descrito en la metodología:

En la siguiente tabla se muestran las 15 lecturas y el promedio para cada punto evaluado:

**Tabla 9. Lecturas del rebote del esclerómetro.**

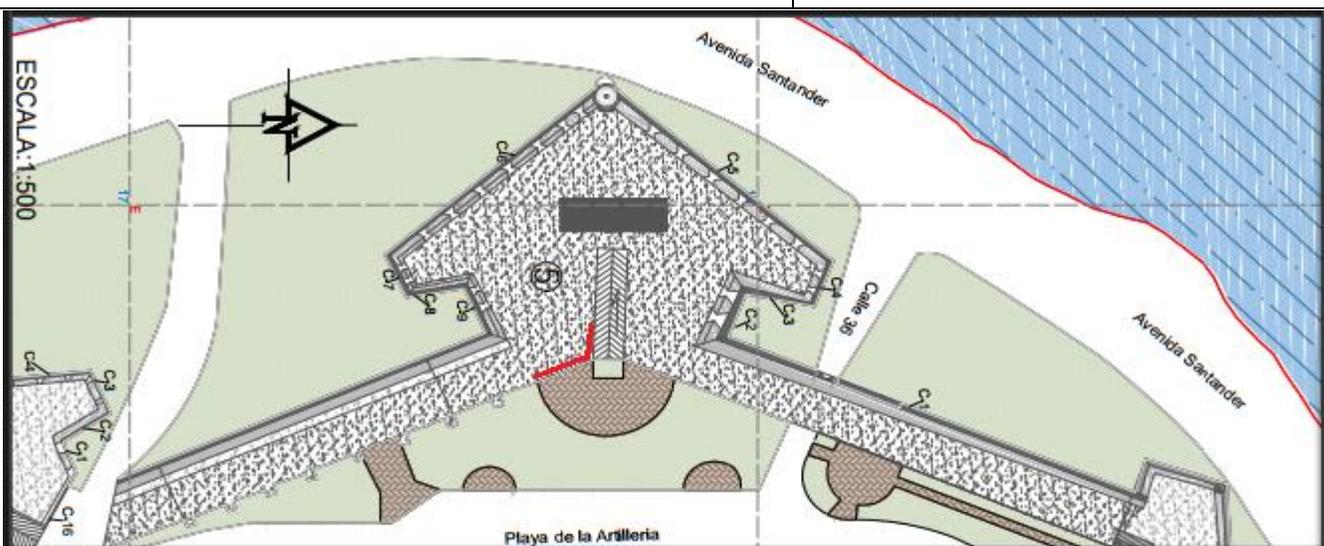
**Fuente: Autores.**

<b>Puntos</b>	<b>Rebotes</b>	<b>Rebote promedio</b>
<b>1</b>	30-36-28-35-25-28-40-36-28-26-32-30-24-30-26	30,27
<b>2</b>	30-30-28-28-35-26-22-22-28-26-26-22-38-36-30	27,0
<b>3</b>	30-35-25-30-35-45-40-30-32-28-32-35-29-28-30	32,26
<b>4</b>	25-25-20-22-30-40-25-28-21-24-26-25-27-22-26	25,73
<b>5</b>	25-25-25-28-20-22-22-22-26-29-26-23-27-22-24	24,4
<b>6</b>	35-29-26-38-28-32-28-32-24-24-26-26-28-25-28	28,6
<b>7</b>	20-26-20-25-25-25-26-28-20-22-30-28-26-28-25	24,93
<b>8</b>	26-22-20-22-25-38-28-28-32-38-30-28-24-28-24	27,53



**Tabla 10. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 1 y análisis de los resultados.**

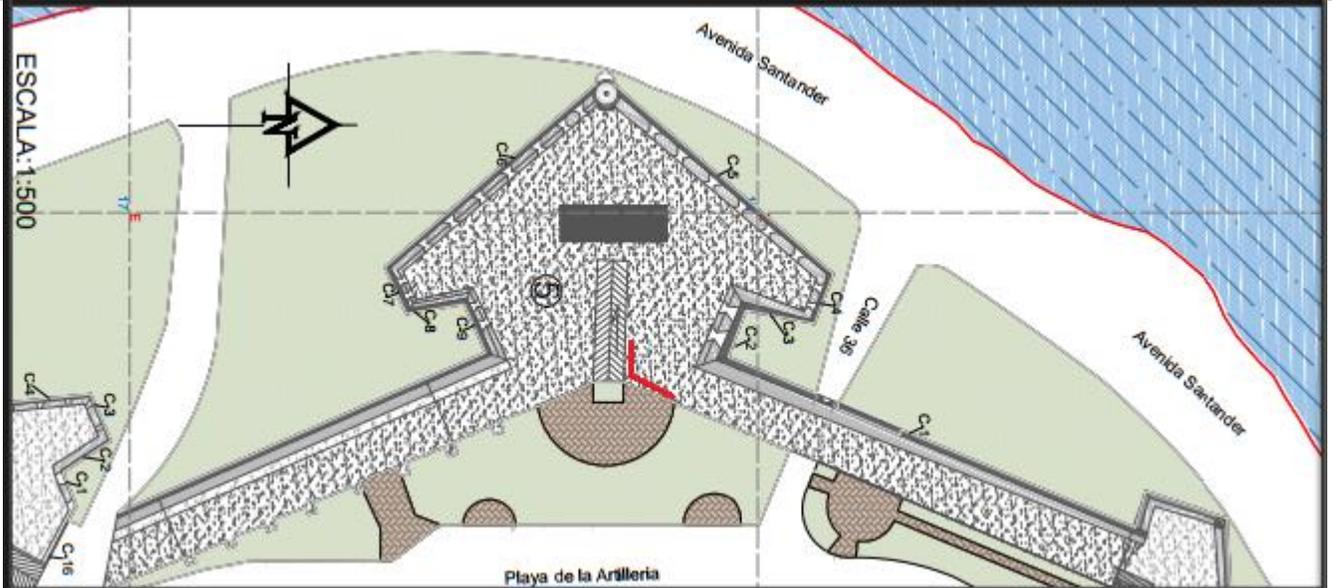
**Fuente: Autores**

<b>PUNTO 1: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)</b>		
	Humedad natural (%): 1.2	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	30,27	244
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .		
		



**Tabla 11. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 2 y análisis de los resultados.**

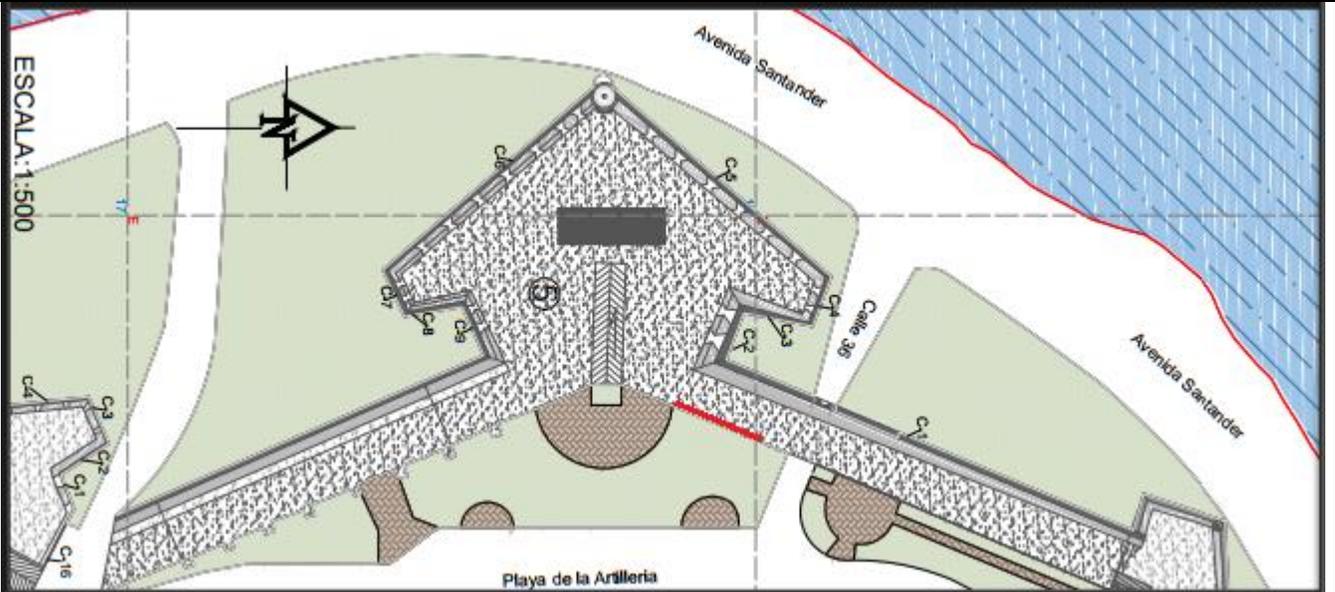
**Fuente: Autores**

<b>PUNTO 2: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)</b>		
	Humedad natural (%): 2.3	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	27	220
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .		
		



**Tabla 12. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 3 y análisis de los resultados.**

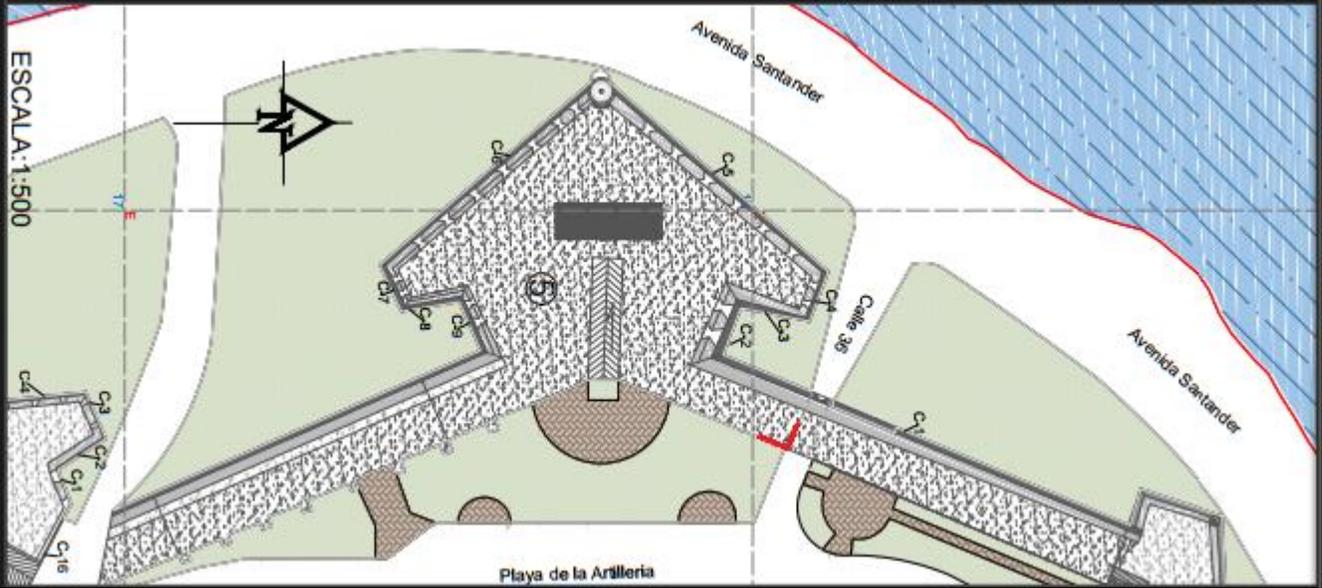
Fuente: Autores

PUNTO 3: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 10.7	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	32,26	270
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .		
		



**Tabla 13. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 4 y análisis de los resultados.**

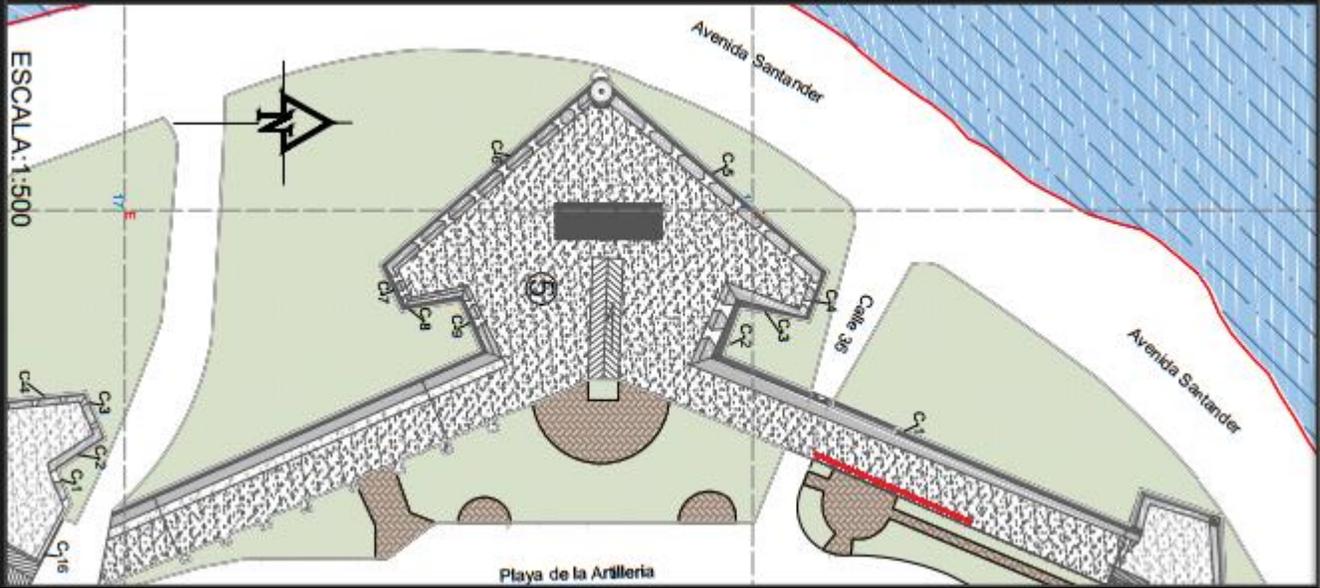
Fuente: Autores

PUNTO 4: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 4	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	25,73	170
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>débil</i> .		
		



**Tabla 14. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 5 y análisis de los resultados.**

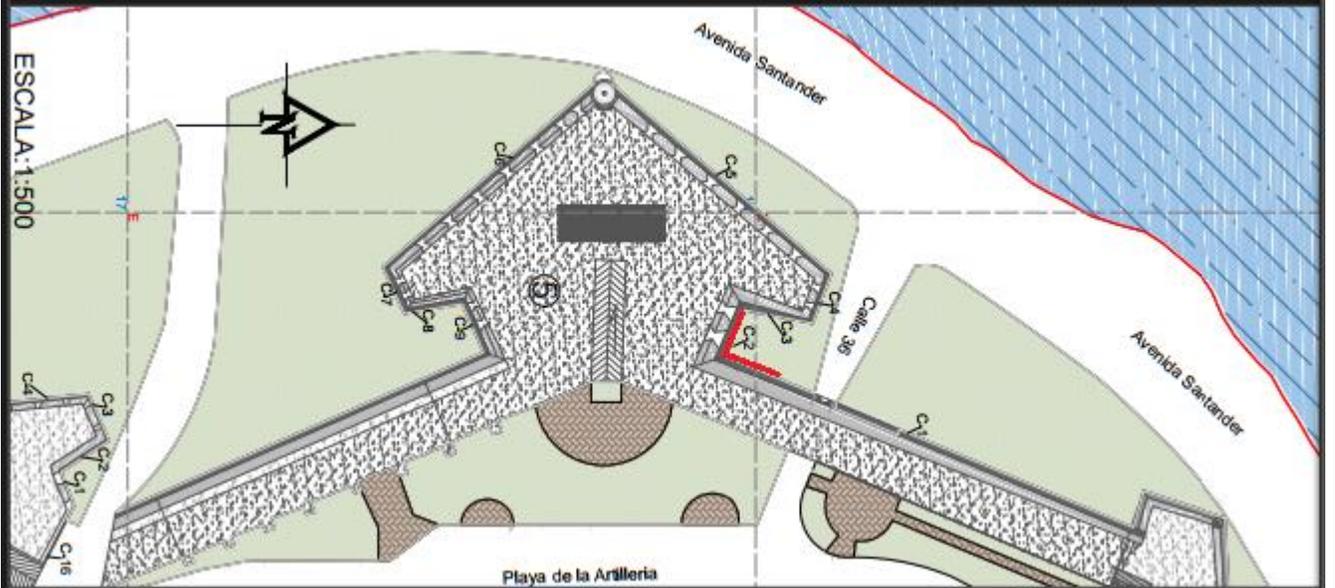
Fuente: Autores

PUNTO 5: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 1.1	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	24,4	156
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>débil</i> .		
		



**Tabla 15. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 6 y análisis de los resultados.**

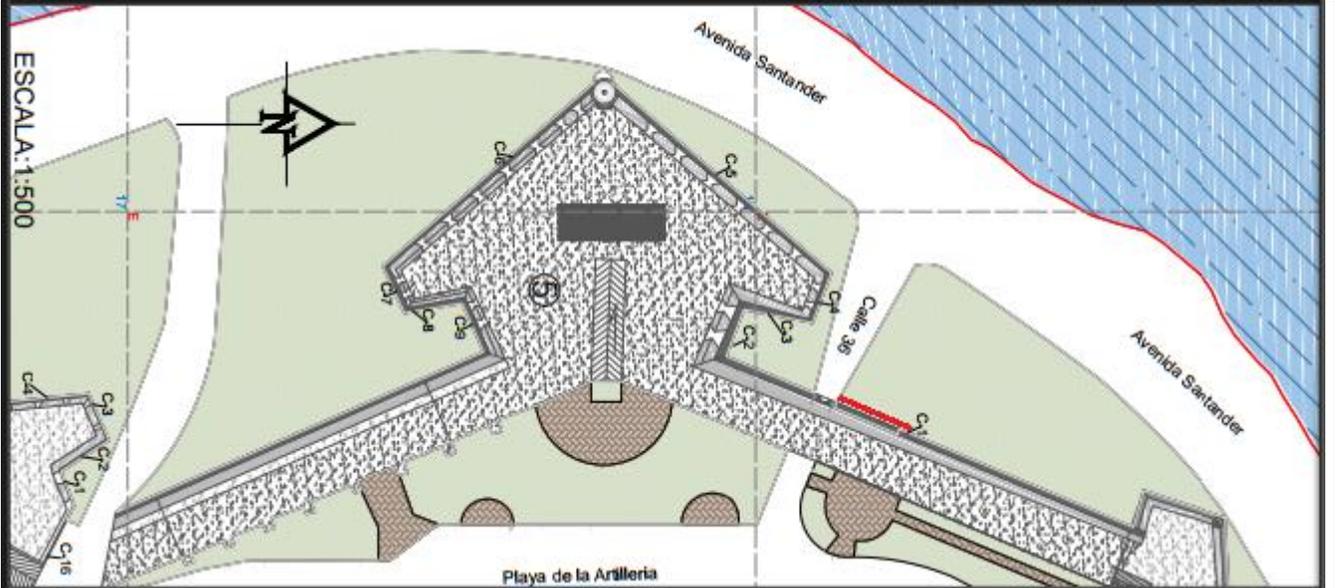
Fuente: Autores

PUNTO 6: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)		
	Humedad natural (%): 10.1	
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	28,6	217
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .		
		



**Tabla 16. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 7 y análisis de los resultados.**

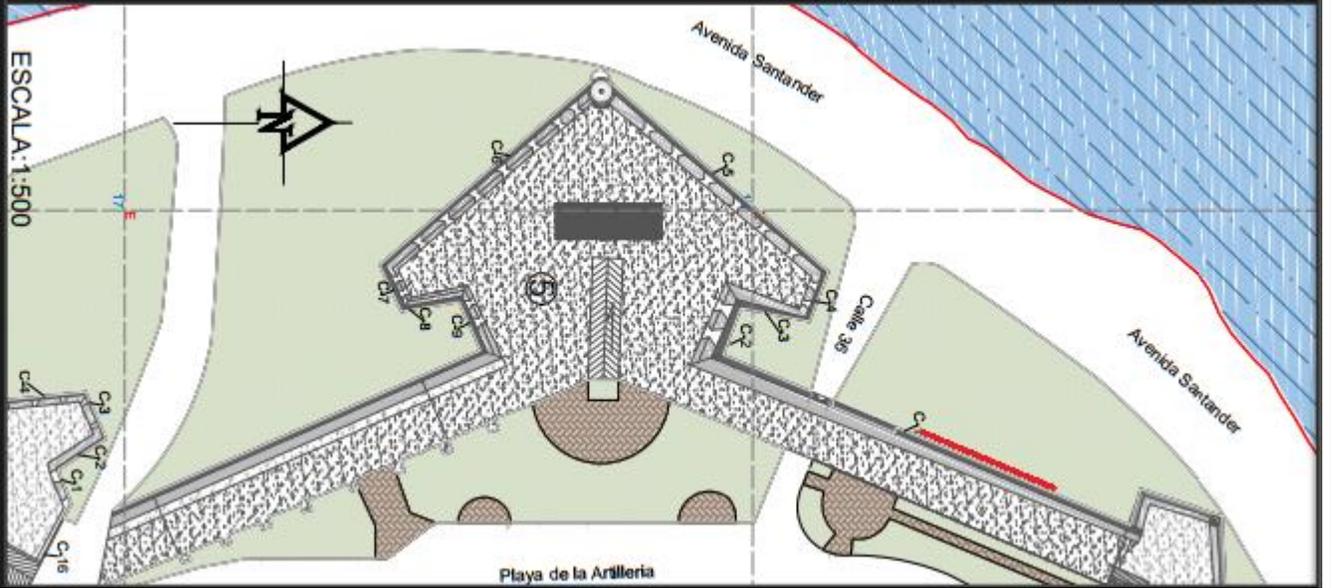
**Fuente: Autores**

<b>PUNTO 7: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)</b>					
	Humedad natural (%): 10.5				
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">Rebote promedio</td> <td style="text-align: center;">Resistencia kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">24,93</td> <td style="text-align: center;">160</td> </tr> </table>	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	24,93	160
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>			
24,93	160				
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>débil</i> .					
					



**Tabla 17. Lugar de aplicación del ensayo de esclerómetro punto 8 y análisis de los resultados.**

Fuente: Autores

<b>PUNTO 8: Aplicación del ensayo de esclerómetro zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)</b>					
	Humedad natural (%): 4.9				
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">Rebote promedio</th> <th style="width: 50%;">Resistencia kg/cm<sup>2</sup></th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">27,53</td> <td style="text-align: center;">200</td> </tr> </table>	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	27,53	200
	Rebote promedio	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>			
27,53	200				
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .					
					



### 5.2.2 Ultrasonic pulse velocity (UPV)

Se realizaron los ensayos en 8 puntos distintos en la cortina de la muralla que va desde el Baluarte Santo Domingo hasta el baluarte Santa Cruz como está descrito en la metodología:

**Tabla 18. Lecturas con el equipo de ultrasonido para cada punto**

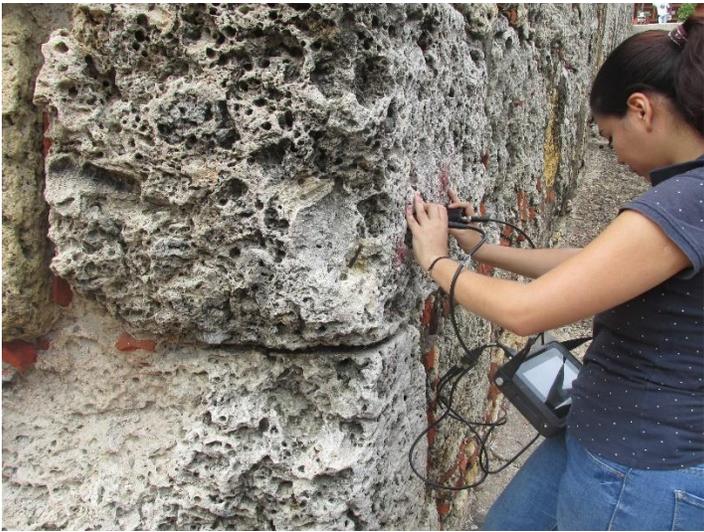
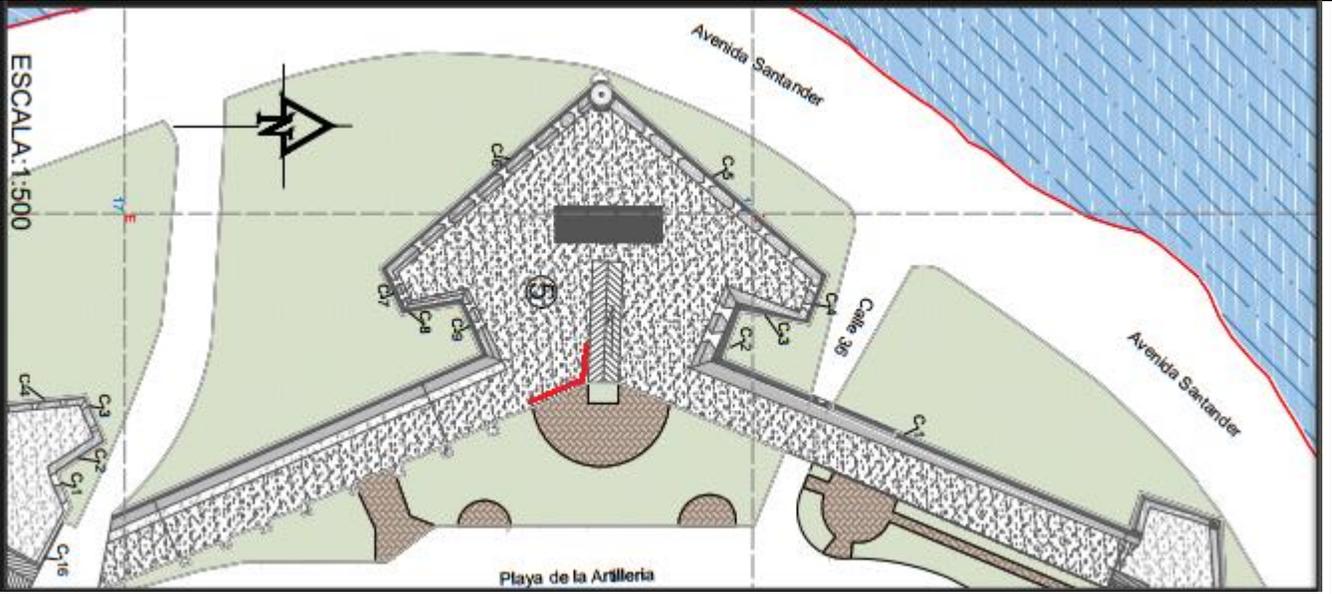
**Fuente: Autores**

<b>Puntos</b>	<b>Lecturas (psi)</b>	<b>Lectura promedio (psi)</b>
<b>1</b>	3400-3340-3500	3413
<b>2</b>	3000-3050-3085	3045
<b>3</b>	3750-3745-3805	3766
<b>4</b>	2400-2450-2400	2416
<b>5</b>	2200-2210-2235	2215
<b>6</b>	3005-3085-3100	3063
<b>7</b>	2280-2295-2260	2278
<b>8</b>	2844-2870-2832	2848



**Tabla 19. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 1 y análisis de los resultados.**

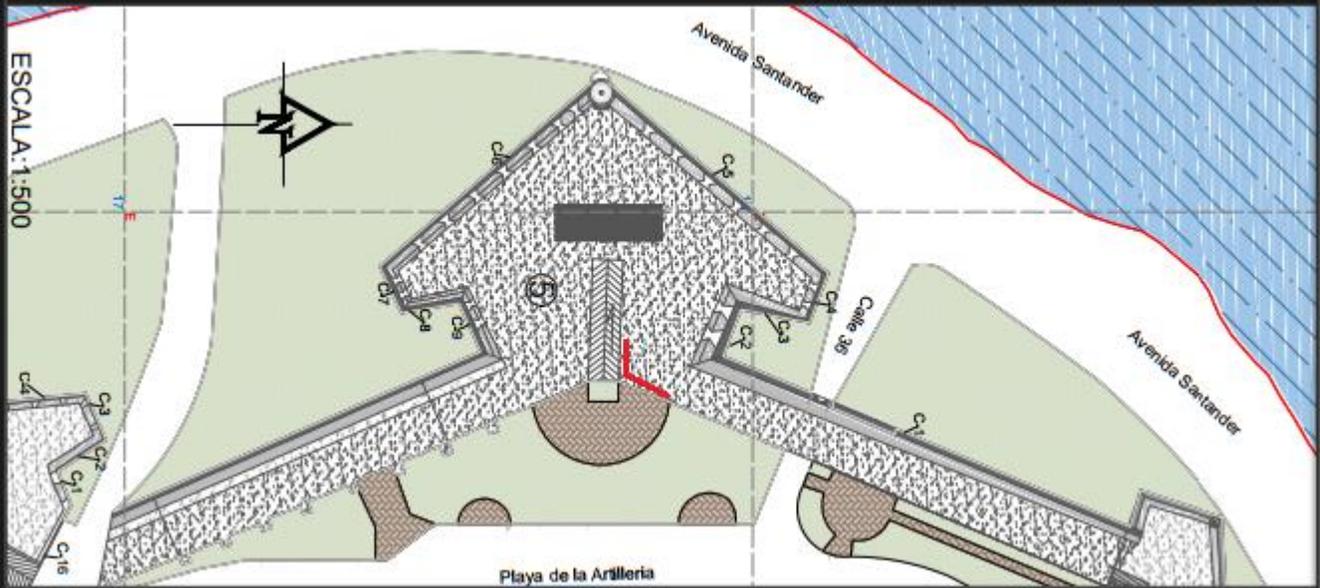
Fuente: Autores

PUNTO 1: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 1.2	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	3413	240
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <b><i>Moderadamente resistente</i></b> .		
		



**Tabla 20. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 2 y análisis de los resultados.**

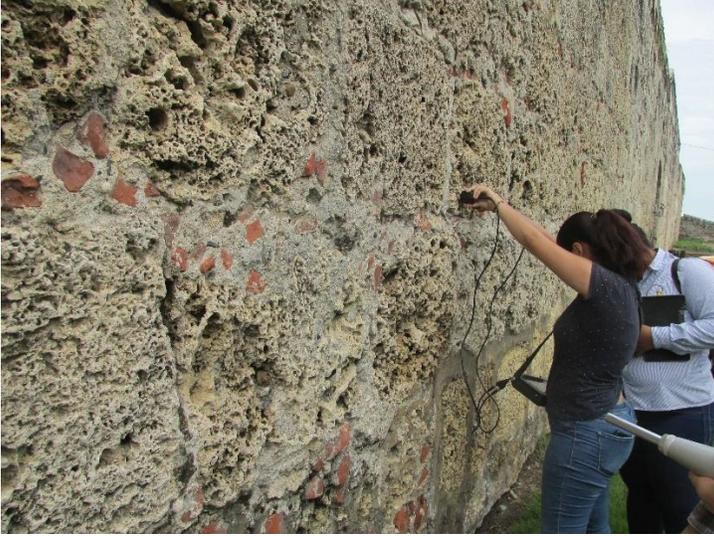
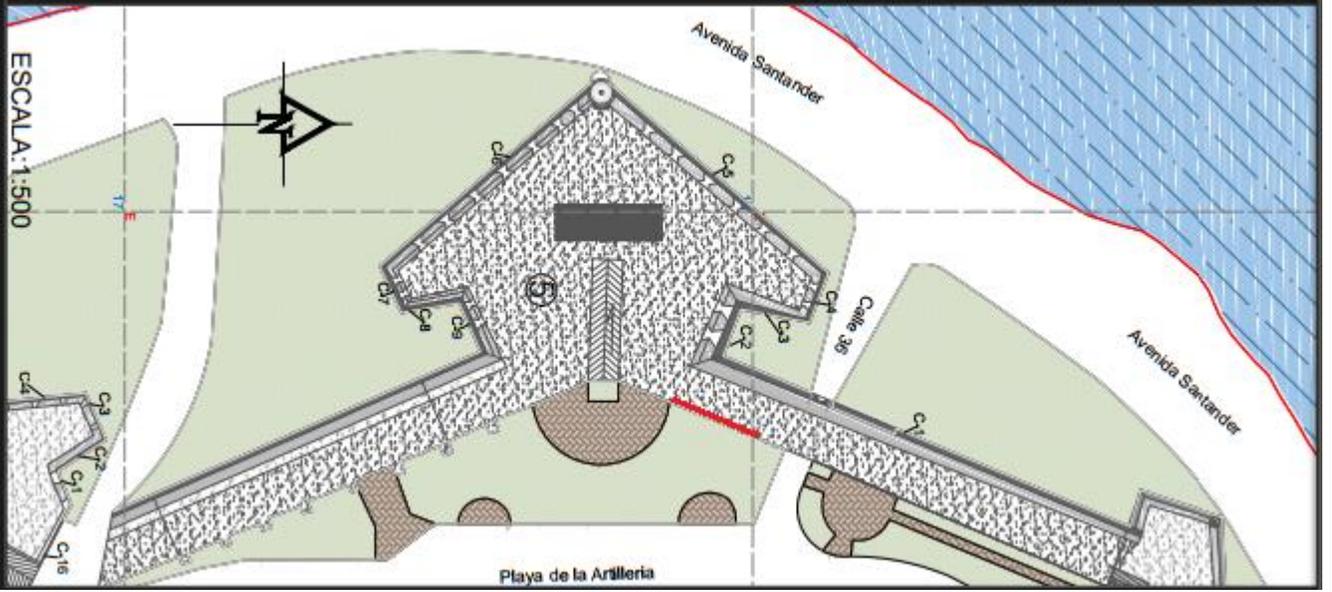
Fuente: Autores

<b>PUNTO 2: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)</b>					
	Humedad natural (%): 2.3				
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">Lectura promedio(ψi)</th> <th style="width: 50%;">Resistencia kg/cm2</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3045</td> <td style="text-align: center;">214</td> </tr> </table>	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2	3045	214
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2			
	3045	214			
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .					
					



**Tabla 21. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 3 y análisis de los resultados.**

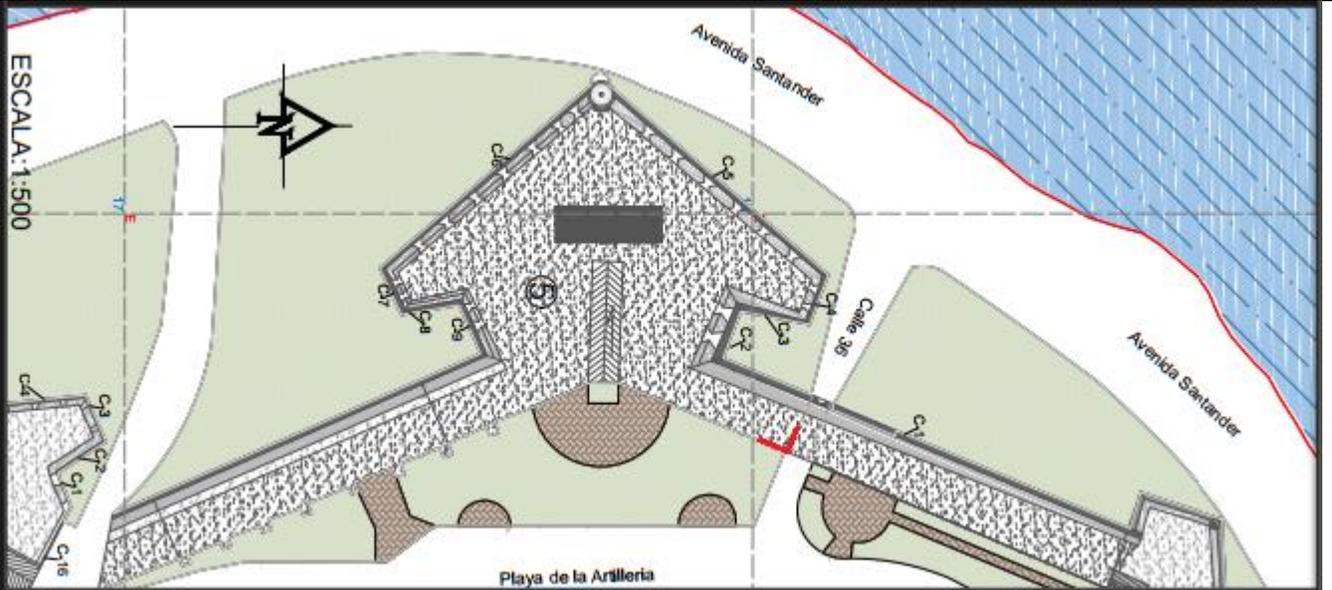
Fuente: Autores

PUNTO 3: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 10.7	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	3766	265
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <b>Moderadamente resistente</b> .		
		



**Tabla 22. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 4 y análisis de los resultados.**

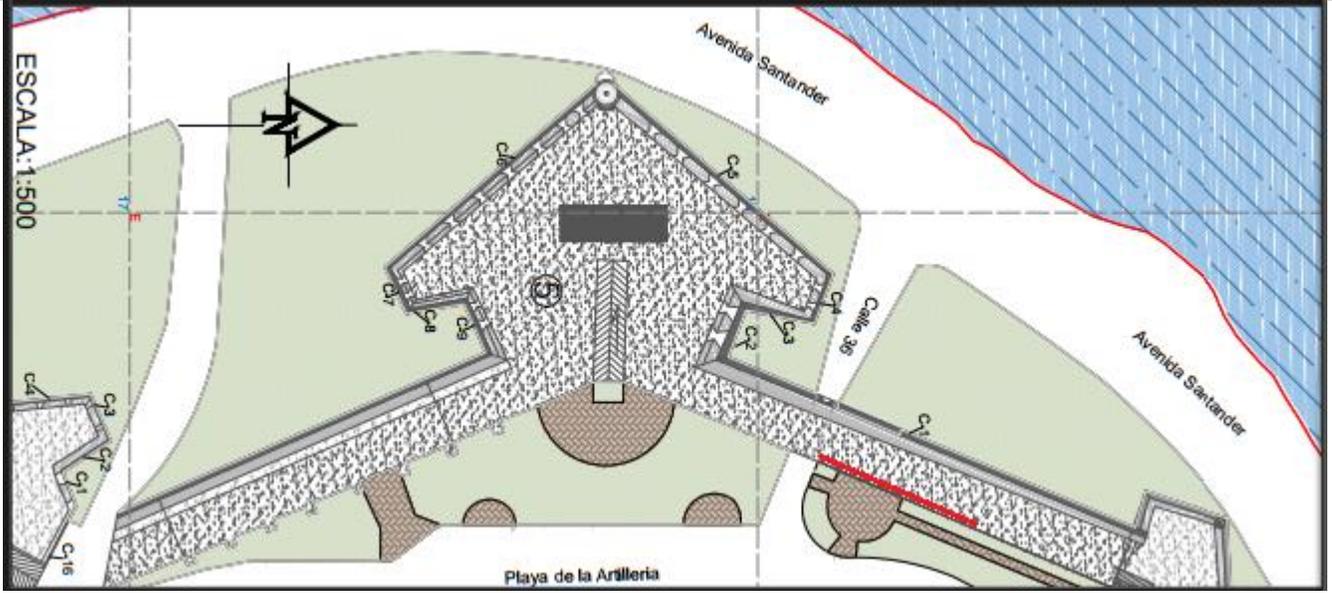
Fuente: Autores

PUNTO 4: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 4	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	2416	170
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <b>Débil</b> .		
		



**Tabla 23. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 5 y análisis de los resultados.**

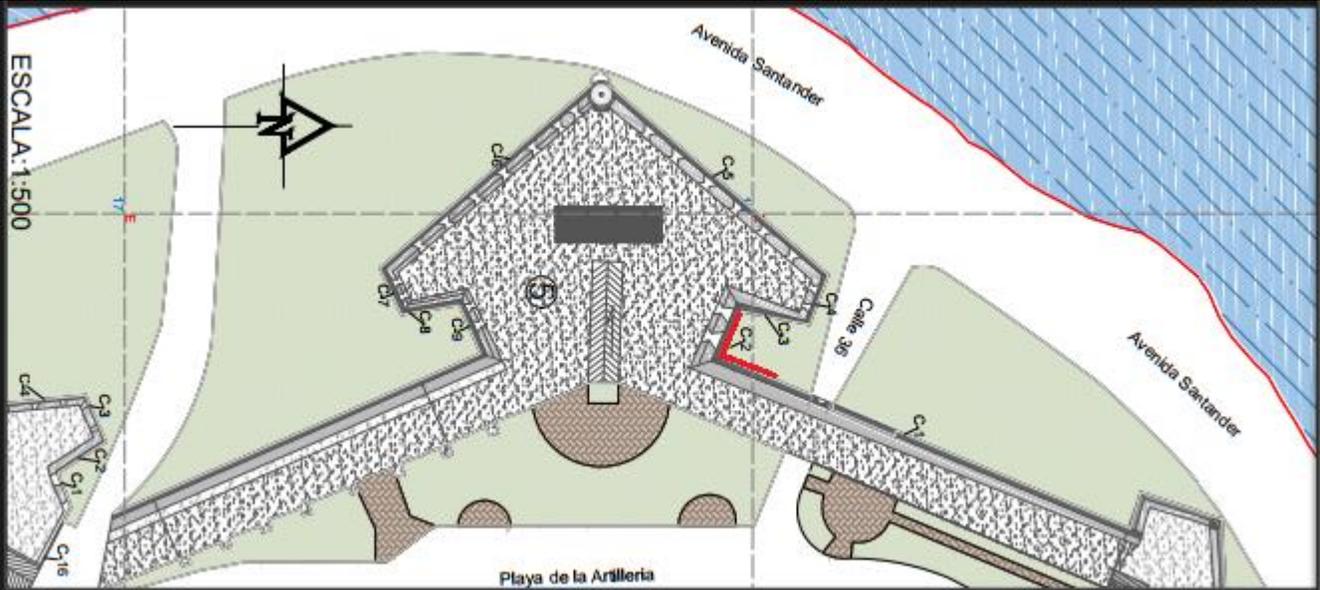
Fuente: Autores

PUNTO 5: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (contraescarpa)		
	Humedad natural (%): 1.1	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2
	2215	156
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <b>Débil</b> .		
		



**Tabla 24. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 6 y análisis de los resultados.**

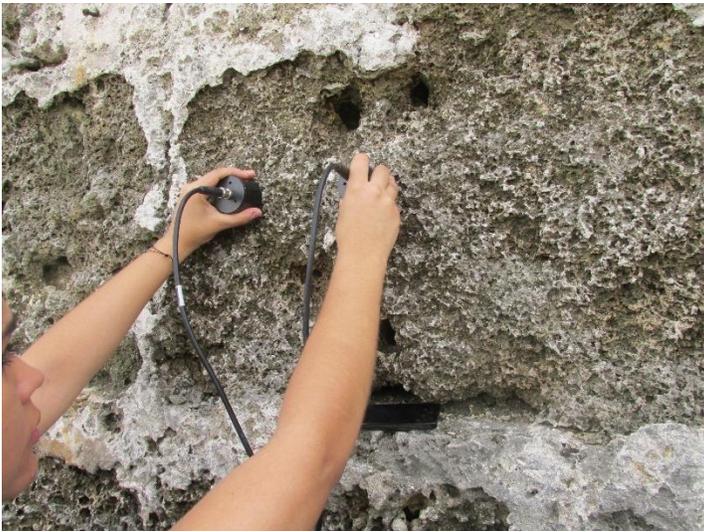
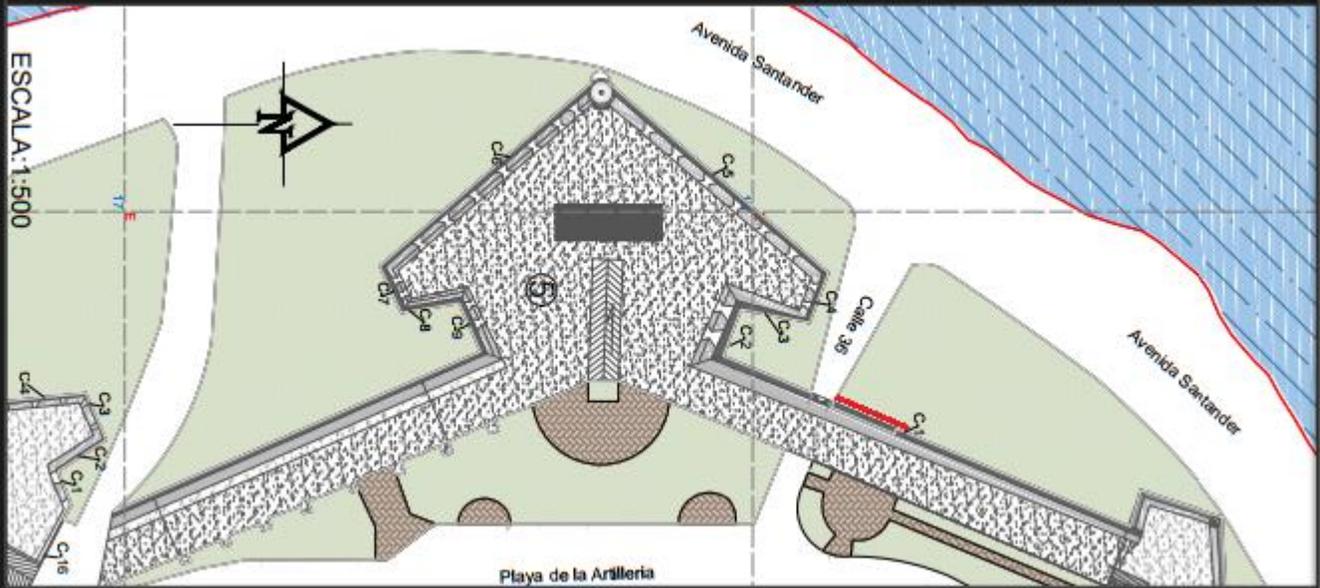
Fuente: Autores

PUNTO 6: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)		
	Humedad natural (%): 10.1	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
	3063	215
	De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .	
		



**Tabla 25. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 7 y análisis de los resultados.**

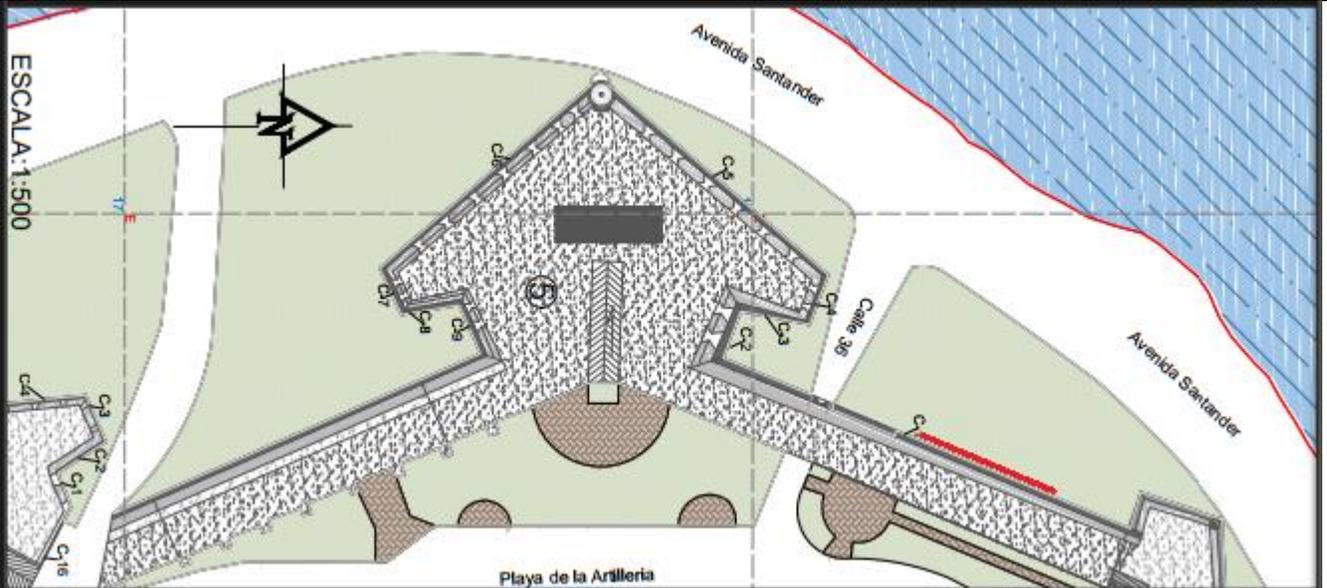
Fuente: Autores

<b>PUNTO 7: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)</b>					
	Humedad natural (%): 10.5				
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">Lectura promedio(ψi)</th> <th style="width: 50%;">Resistencia kg/cm2</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2278</td> <td style="text-align: center;">160</td> </tr> </table>	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2	2278	160
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2			
	2278	160			
De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <b><i>Débil</i></b> .					
					



**Tabla 26. Lugar de aplicación del ensayo UPV punto 8 y análisis de los resultados.**

Fuente: Autores

PUNTO 8: Aplicación del ensayo UPV zona Baluarte Santo Domingo (escarpa)		
	Humedad natural (%): 4.9	
	Lectura promedio(ψi)	Resistencia kg/cm2
	2278	200
	De acuerdo a la resistencia obtenida en este punto, su clasificación según la ISRM (tabla 4) sería <i>Moderadamente resistente</i> .	
		



### 5.2.3 Resistencia con esclerómetro y Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las resistencias obtenidas en cada punto, tanto para el ensayo de esclerometría y el de UPV, con su respectiva humedad natural y temperatura.

**Tabla 27. Resumen de los datos obtenidos.**

**Fuente: Autores**

<b>Puntos</b>	<b>Resistencia con Esclerómetro (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia con UPV (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Humedad natural (%)</b>	<b>Clasificación de la roca (ISRM)</b>
<b>1</b>	244	240	1.2	Moderadamente resistente
<b>2</b>	220	214	2.3	Moderadamente resistente
<b>3</b>	270	265	10.7	Moderadamente resistente
<b>4</b>	170	170	4	Débil
<b>5</b>	156	156	1.1	Débil
<b>6</b>	217	215	10.1	Moderadamente resistente
<b>7</b>	160	160	10.5	Débil
<b>8</b>	200	200	4.9	Moderadamente resistente
<b>Promedio</b>	204,6	202,5	4	Moderadamente resistente



### 5.3 RECOMENDACIÓN PARA PLAN DE INTERVENCIÓN

La primera recomendación que se hace es realizar un cambio de las rocas en los puntos en los cuales se clasificó según la ISRM como débil (puntos 4, 5 y 7), además de tener en cuenta que las rocas reemplazantes tengan como característica poca porosidad, con el fin que cuando se vayan a hacer ensayos de tipo no destructivo, tales como los realizados en esta investigación se puedan aplicar de manera óptima y obtener resultados mucho más confiables.

La segunda recomendación se basó en identificar cada una de las patologías presentes en el tramo de estudio y su ubicación exacta por medio de un sistema de coordenadas, se procedió a proveer una posible solución a cada una de estas.

A continuación, se detallan cada una de las patologías encontradas en el sector de estudio:





### Figura 15. Patología #1

Fuente: Autores

### Tabla 28. diagnostico patología #1

Fuente: Autores

#### Patología #1

<b>Ubicación: Escarpa- baluarte santa cruz</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'28,03"	75°33'14,21"	±3
<b>Daño presente: Caries Profundas</b>		





### **Figura 16. Patología #2**

**Fuente: Autores**

**Tabla 29. Diagnóstico patología #2**

**Fuente: Autores**

#### **Patología #2**

<b>Ubicación: Escarpa- Cortina Santa Cruz-Santo Domingo</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'45,4"	75°33'20,1"	±3
<b>Daño presente: Caries Superficiales, material desprendido</b>		



**Figura 17. Patología #3**

**Fuente: Autores**

**Tabla 30. Diagnóstico Patología #3**

**Fuente: Autores**

**Patología #3**

<b>Ubicación: Escarpa- Cortina Santa Cruz-Santo Domingo</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'45,2"	75°33'20,3"	±3
<b>Daño presente: Caries superficial</b>		



**Figura 18. Patología #4**

**Fuente: Autores**

**Tabla 31. Diagnóstico Patología #4**

**Fuente: Autores**

**Patología #4**

<b>Ubicación: Escarpa- Cortina Santa Cruz-Santo Domingo</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'44,3"	75°33'21,3"	±3
<b>Daño presente: Caries superficial</b>		



**Figura 19. Patología #5**

**Fuente: Autores**

**Tabla 32. Diagnóstico patología #5**

**Fuente: Autores**

**Patología #5**

<b>Ubicación: Escarpa Baluarte Santo Domingo</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'39,6"	75°33'27,1"	±3
<b>Daño presente: Caries Superficiales</b>		



**Figura 20. Patología #6**

**Fuente: Autores**

**Tabla 33. Diagnóstico patología #6**

**Fuente: Autores**

**Patología #6**

<b>Ubicación: Escarpa - Cortina Santo Domingo- Santiago</b>		
<b>Coordenadas</b>		
<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Error</b>
10°25'28,5"	75°33'29,6"	±5
<b>Daño presente: Perdida de Juntas de dilatación</b>		

- Para las patologías 1, 2, 3, 4 y 5 que son diferentes tipos de caries, es recomendable implementar un proceso de devastación de más o menos 8 a 10 cm en la roca, luego



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.



colocar con argamasa de cal y canto una placa rocosa de características similares a el material constitutivo del sitio, esto asegura su imagen estética y se conserva la parte autentica del sitio a intervenir.

- Para la patología 6, se recomienda recalzar las juntas procurando que queden a ras con la piedra, este procedimiento debe realizarse con argamasa, así evitaremos que la estructura sufra inestabilidad.



## 6. CONCLUSIONES

Luego de haber analizado los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Los resultados obtenidos son poco confiables, debido a las características físicas en que fueron ensayadas, presencia de humedad superficial en algunos sectores, porosidad alta, discontinuidad del material que compone la muralla y superficie no lisa, todos estos parámetros afectaron el resultado final de los ensayos aplicados; además cabe destacar que los resultados de los ensayos de esclerometría y ultrasonido dieron valores muy similares esto no indica que los ensayos sean confiables, puesto que haciendo comparaciones con otros estudios realizados anteriormente se encuentran los datos muy dispersos.
- Este estudio realizado en la cortina que está entre el Baluarte Santo Domingo y el Baluarte Santa Cruz nos dio a conocer cuáles son los parámetros que afectan directamente la aplicación y la confiabilidad de los ensayos no destructivos, como lo son la humedad, ya que la presencia de humedad en el sitio de aplicación dificultaba el rebote del esclerómetro y por lo tanto no daba un resultado preciso ni muy confiable, otro parámetro influyente al momento de aplicar los ensayos no destructivos fue la porosidad y discontinuidad del material que compone la muralla, ya que este parámetro hacía que se dispersara la onda emitida por el equipo UPV y se hizo imposible la aplicación de este ensayo de manera directa en este sector de estudio, por lo que se aplicó de manera indirecta y semidirecta dando resultados un poco elevados y poco confiables.
- De acuerdo a los datos de resistencia obtenidos con el esclerómetro y ultrasonido se pudo notar una similitud entre los resultados para cada punto, y de esta manera clasificar la resistencia en moderadamente resistente (punto 1, 2, 3, 6 y 8) y débil (punto 4,5 y 7) según la ISRM; y en general el tramo de la muralla se pudo clasificar como moderadamente resistente, de acuerdo al promedio obtenido para ambos ensayos siendo 204,6 Kg/cm<sup>2</sup> para el de esclerometría y 202,5 Kg/cm<sup>2</sup> para el de ultrasonido.



- Haciendo una comparación de la resistencia en el tramo de estudio con la realizada en la tesis titulada “PLAN DE INTERVENCIÓN Y MONITOREO DE LAS PATOLOGÍAS DEL CORDÓN AMURALLADO DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS CASO DE ESTUDIO: BALUARTE LA MERCED- BALUARTE SAN FRANCISCO JAVIER” (Javier Hernando Morelo González, 2015), en la cual se obtuvo una resistencia promedio de 119 Kg/cm<sup>2</sup> con pruebas de esclerometría, que según la ISRM se clasifica como débil, nos dimos cuenta que en nuestro tramo de estudio se encuentra en mejores condiciones, ya que obtuvimos una resistencia promedio de 204,6 Kg/cm<sup>2</sup> por el esclerometría, para una clasificación de la roca como moderadamente resistente.
- También realizando otra comparación entre los datos obtenidos en nuestro tramo de estudio y los de la tesis titulada “COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN ENTRE MAMPOSTERÍA COLONIAL MIXTA PRESENTE EN EDIFICACIONES Y FORTIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE CARTAGENA DE INDIAS, Y MURETES FABRICADOS BAJO CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN SEMEJANTES” (Andrés Felipe Camargo Bocanegra y José Carlos Gamarra Torres, 2016) en la cual obtuvieron una resistencia promedio de 39,88 Kg/cm<sup>2</sup> mediante pruebas de ultrasonido aplicadas en un tramo de la contraescarpa de la muralla, podemos notar una diferencia significativa con nuestros resultados los cuales son en promedio 202,5 Kg/cm<sup>2</sup>, cabe destacar que en la tesis titulada “CONVENIENCIA DEL USO DE LA PIEDRA CALIZA Y LA ARGAMASA EN LOS PROCESOS DE RESTAURACION DE LA ESCARPA EN LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS.” (Adalberto Rafael Coronado Reyes y José Daniel Cogollo Galindo, 2015) mediante el uso de pruebas de ultrasonido aplicadas en la escarpa de la muralla (sector Baluarte San Pedro Mártir – Las Bóvedas) en promedio se obtuvo una resistencia de 108,63 Kg/cm<sup>2</sup>, teniendo esto en cuenta podemos concluir que los resultados obtenidos por medio de ensayos de ultrasonido no son confiables en estructuras de material heterogéneo, debido a su gran porosidad que hace que la onda se distorsione dentro de éste.



## 7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones similares a esta, teniendo en cuenta que se deben medir parámetros como la porosidad y continuidad del material a ensayar, ya que este parámetro es fundamental para obtener resultados confiables para el ensayo UPV.
- Hacer inspecciones con el ensayo UPV para notar que puntos o que áreas se encuentran porosas o discontinuas para hacer su respectiva intervención a futuro.
- Se recomienda hacer estudios posteriores de ensayos no destructivos diferentes a los de esclerometría y ultrasonido, para así comparar los datos y notar que tanto difieren los resultados con anteriores realizados y saber que tan confiables son.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- AYDIN, A. (2009). *ISRM SUGGESTED METHOD FOR DETERMINATION OF THE SCHMIDT HAMMER REBOUND HARDNESS: REVISED VERSIÓN* (1st ed.).
- B. Gea, S., E. Toledo, M., & G. Nallim, L. (2007). *EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL DEL MINISTERIO DE SALUD DE LA NACIÓN* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Salta.
- BUSTAMANTE PEÑA, C., & GONZALEZ MORALES, D. (2014). *EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PARA LA PATOLOGÍA DEL PUENTE ROMÁN UBICADO EN EL BARRIO MANGA*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Cartagena.
- Cunin, E., & Rinaudo, C. (2010). *LAS MURALLAS DE CARTAGENA ENTRE PATRIMONIO, TURISMO Y DESARROLLO URBANO*. El papel de la Sociedad de Mejoras Públicas. *Memorias*, 2(2), 1–21.
- CSI Spain / SAP2000. (2017). *Csiespana.com*. Retrieved 5 April 2017, from <http://www.csiespana.com/software/2/sap2000>
- Dekker, M. (2002). *Non destructive Evaluation. Theory, Techniques, and Applications* (1st ed.). E.U.A.: Peter J. Shull.
- DÍAZ ANDRADE, L., & MÉNDEZ PINEDA, J. (2015). *PLAN PARA INTERVENCIÓN Y MONITOREO DE LAS PATOLOGÍAS DEL CORDÓN AMURALLADO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS* (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena.
- El universal. (2014). *CONTINÚA POLÉMICA POR TÍTULO DE PATRIMONIO DE CARTAGENA*. Retrieved from <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/continua-polemica-por-titulo-de-patrimonio-de-cartagena-178676>
- Gea, S., Quinteros, R., & Nallim, L. (2014). *CONTROL DEL PROCESO DE DESHUMIDIFICACIÓN DE MUROS CON GEORRADAR. UN EDIFICIO PATRIMONIAL COMO CASO DE ESTUDIO*. Universidad Nacional de Salta.
- LOMBILLO, I., VILLEGAS, L., SILIÓ, D., & HOPPE, C. (2017). *EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO*. *Revista Internacional Construlink*, (Vol. 6).
- M. P. SCHULLER, "NONDESTRUCTIVE TESTING AND DAMAGE ASSESSMENT OF MASONRY STRUCTURES"; John Wiley & Sons, Ltd.; 2003. [artículo]
- MORELO GONZALEZ, J. (2015). *PLAN DE INTERVENCIÓN Y MONITOREO DE LAS PATOLOGÍAS DEL CORDÓN AMURALLADO DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS* (Tesis de pregrado). Universidad de



Cartagena.

NAVARRO OYOLA, J., & TRUJILLO ORDOÑEZ, G. (2014). *EVALUACIÓN PATOLÓGICA Y DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL FUERTE SAN FERNANDO DE BOCACHICA*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena.

Núñez, C., Roca, A., & Jorba, J. (2013). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES, VOLUMEN II. ENSAYOS MECÁNICOS. Ensayos no destructivos* (1st ed.).

O. DUDA, R., & E. HART, P. (1973). *PATTERN CLASSIFICATION AND SCENE ANALYSIS* (1st ed.). NUEVA YORK.

P. GREGORCZYK, P.B. LOURENÇO, "A REVIEW ON FLAT-JACK TESTING"; 2000. [artículo]

RAMÍREZ GÓMEZ, F. (1996). *INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES* (4th ed.). Madrid.

*STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINATION OF ROCK HARDNESS BY REBOUND HAMMER METHOD*. (2005) (1st ed.).

Valdebenito, G., Aguilar, V., Aburto, P., Alvarado, D., P. Muñoz, J., & Sandoval, C. et al. (2014). *RESTAURACIÓN DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DE ALBAÑILERÍA EN ZONAS DE SISMICIDAD ALTA: APLICACIÓN AL MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO DE VALDIVIA, CHILE*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

VARELA RAMIREZ, E., & ZETIEN SILVA, I. (2013). *EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO DE LA CASA CURAL DE LA IGLESIA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO DE CARTAGENA DE INDIAS* (Tesis de Pregrado). Universidad de Cartagena.



Evaluación, diagnóstico estructural y funcional a las murallas de Cartagena mediante la implementación de técnicas no destructivas y determinando la confiabilidad de éstas: sector baluarte de Santo Domingo.

