



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

TESIS

**DESARROLLO Y ADAPTACIÓN DE TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN
FÍSICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN EDIFICIOS PATRIMONIALES
CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA CONSERVACIÓN DEL
PATRIMONIO HISTÓRICO**

PRESENTA

Raudel Padilla Ceniceros

***PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS
ANTRÓPICOS***

TUTOR

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORAL

Dr. Rubén Alfonso López Doncel

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Dr. Marco Alejandro Sifuentes Solís

Dr. Gerardo Araiza Garaygordóbil

Aguascalientes, Ags, a 29 de Mayo del 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



Centro de Ciencias
del Diseño y de
la Construcción

Oficio: CCDC-D-131-2017
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "Desarrollo y adaptación de técnicas de caracterización física de sistemas constructivos en edificios patrimoniales con métodos no destructivos para la conservación del patrimonio histórico". Presentado por el sustentante: M. en Ing. Raudel Padilla Ceniceros, con ID 147919, egresado del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 18 de mayo de 2017

"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC
c.c.p.- Dr. Alejandro Acosta Collazo – Secretario Técnico del Doctorado en C. de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor de tesis del alumno
c.c.p.- M. en Ing. Raudel Padilla Ceniceros – Egresado del Doctorado en C. de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

OVG/rbv



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Asunto: Voto aprobatorio impresión
Tesis de Raudel Padilla Ceniceros

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
M. EN FIL. OMAR VAZQUEZ GLORIA
PRESENTE

Por medio del presente como tutor designado del estudiante **RAUDEL PADILLA CENICEROS** con ID 147919 quien realizó la tesis titulada: **DESARROLLO Y ADAPTACIÓN DE TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN EDIFICIOS PATRIMONIALES CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO**, y con fundamento en el artículo 175, apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Por lo anterior deajo a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 26 de Mayo de 2017

Dr. Jesús Pácheo Martínez
Tutor de tesis

Dr. Rubén Alfonso López Doncel
Cotutor

Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Cotutor

c.c.p. Ricardo Arturo López León - Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC
c.c.p. Alejandro Acosta Collazo - Secretario Técnico del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p. M. en Ing. Raudel Padilla Ceniceros - Egresado del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p. Archivo

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Raudel Padilla Ceniceros

Por medio de la presente se hace constar que el libro digital: *Convergencias del Diseño y de la Construcción Vol. V; Arquitectura. Ingeniería Civil y Urbanismo. Alteraciones antrópicas en la ciudad y el medio ambiente*, coordinado por el Dr. Alejandro Acosta Collazo, en el cual usted es autor del capítulo titulado “Caracterización y clasificación de los sistemas constructivos de mampostería de edificios históricos del estado de Aguascalientes”, será publicado por el Departamento Editorial de esta Institución, en el año 2016, y contará con registro ISBN.

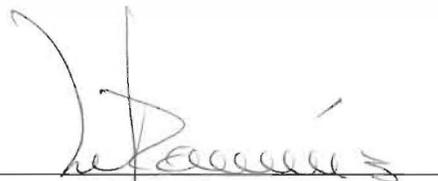
Para los fines legales que el interesado solicite, se extiende la presente constancia que avala la aceptación de la publicación.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, a 11 de agosto de 2016.

“Se Lumen Proferre”



M.E. Martha Esparza Ramírez
Jefa del Departamento Editorial

c.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al tutor Dr. Jesús Pacheco Martínez por darme la oportunidad de integrarme al interesante proyecto de investigación, además de su constante orientación, seguimiento y el apoyo durante la estancia Doctoral.

Agradezco al Dr. Rubén Alfonso López Doncel por su importante colaboración y aportación de conocimientos en el área de investigación, así como al personal del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por su colaboración y apertura durante la etapa experimental.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Aguascalientes y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada y por darme la oportunidad de desarrollarme profesional y académicamente.

A mi madre Ángela Ceniceros Roldan, hermanos y hermanas por el apoyo mostrado, y las palabras de aliento.

DEDICATORIA

Con dedicación especial a mi esposa Laura Judith López Valenzuela por apoyar en todo momento, por su impulso y motivación constante, por ser mi principal fuente de inspiración y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....14

 1.1 Introducción.....14

 1.2 Hipótesis.....17

 1.3 Objetivos17

 1.4 Metodología.....18

CAPÍTULO 2. ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO22

 2.1 Introducción.....22

 2.2 Marco Teórico22

 2.3 Importancia de la valoración del patrimonio edificado24

CAPÍTULO 3. HISTORIA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES.....28

 3.1 Etapas de construcción de la catedral.....28

 3.2 Identificación de espacios y etapas de construcción34

 3.3 Condiciones actuales de la Catedral35

 3.4 Levantamiento de las patologías de la Catedral37

 3.5 Características y condiciones del subsuelo en el centro de la ciudad de Aguascalientes42

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES50

 4.1 Determinación de dimensiones geométricas de los elementos constructivos.50

 4.2 Características de los sistemas constructivos empleados en muros de mampostería.62

CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A PARTIR DE DATOS CUALITATIVOS. ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE BORRI.....70

 5.1 Introducción.....70

 5.2 Metodología y materiales.....72

 5.3 Resultados80

 5.4 Conclusiones.....82

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DEL DETERIORO DE LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA CATEDRAL BASÍLICA DE AGUASCALIENTES.84

 6.1 Introducción.....84

 6.2 Metodología y materiales.....88

 6.3 Petrografía de las muestras recolectadas.....89

6.4 Pruebas “in situ”	92
6.5 Pruebas de laboratorio	94
6.6 Resultados.....	97
6.7 Discusión	102
6.8 Conclusiones	106
CAPÍTULO 7. DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN INTERNA DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	110
7.1 Introducción	110
7.2 Materiales y métodos	115
7.3 Resultados.....	118
7.4 Discusión de resultados	127
7.5 Conclusiones	130
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES.....	132
CAPÍTULO 9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
ANEXO A. TABLAS Y GRÁFICAS	
ANEXO B. EQUIPO Y COLABORADORES	
ANEXO C. RESULTADOS PUBLICADOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las características y obtención de porcentajes de los tipos de muros encontrados en los edificios históricos del estado de Aguascalientes.....	67
Tabla 2. Propiedades mecánicas y estado de conservación.	73
Tabla 3. Criterios para el análisis de las dimensiones.....	73
Tabla 4. Criterios para el análisis de la forma.....	74
Tabla 5. Criterios para el análisis de las conexiones de las hojas del muro.....	74
Tabla 6. Criterios para el análisis de la horizontalidad de las juntas. Modificada de Borri.	75
Tabla 7. Criterios para el análisis de las propiedades de escalonamiento de las juntas verticales.....	75
Tabla 8. Criterios para el análisis de las propiedades de mortero	76
Tabla 9. Criterios para el análisis de los espesores de juntas	76
Tabla 10. Ponderación propuesta para la evaluación de los nueve tipos de muros de mampostería bajo la acción de carga vertical.....	79
Tabla 11. Categorías de mampostería.....	80
Tabla 12. Tabla de obtención de valores mecánicos mediante el ICM.....	81
Tabla 13. Obtención de valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión y módulo de Young mediante la implementación de la ecuación de regresión exponencial.	82
Tabla 14. Características litológicas de piedras identificadas en la mampostería de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes. * Piedra S03 es un material "fresco" que se utilizó para reemplazar las piedras más deterioradas en las obras de restauración a lo largo de los últimos 30 años.....	89
Tabla 15. Nomenclatura utilizada para las caras de la muestra cúbica	95
Tabla 16. Campaña de pruebas de laboratorio realizadas en muestras de piedra	96
Tabla 17. La porosidad, la densidad aparente y la densidad de la matriz resultaron de la prueba de peso hidrostático.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Trabajos de restauración en edificio histórico.....	15
Figura 2. Imagen de la plaza de armas de la ciudad de Aguascalientes. Al fondo se observa la catedral basílica de Aguascalientes. Litografía de Carl Nebel. Recuperado de https://elpositivoaqs.wordpress.com/cultura/plazaprincipal2/	31
Figura 3. Imagen de la catedral basílica de Aguascalientes con la aparición de las naves laterales.	33
Figura 4. Plano de planta de Catedral. Identificación de etapas de construcción de acuerdo a un orden cronológico.	34
Figura 5. Problemas de asentamiento en el piso de catedral a un costado del presbítero. A) Diferencias de nivel de piso antes de los trabajos de excavación. B) Trabajos de contención y estabilización de suelo durante excavación de zona con mayores asentamientos.	36
Figura 6. Afectaciones debido a problemas de asentamientos. Presencia de grietas en la cúpula lateral a la zona de mayor hundimiento.	36
Figura 7. Trabajos de restauración en la torre norte de la catedral. A) Estructura de andamios colocados para la ejecución de los trabajos. B) Colocación de pieza nueva de cantera sobre moldura.	37
Figura 8. Mapeo litológico de daños y de intensidad de daños sobre el muro de mampostería de la fachada de la catedral de Aguascalientes. Se identifican cuatro tipos de roca: la roca S01, S02, S04 y S05. La zona con mayor intensidad de daños se ubica en el primer metro y medio del muro generándose principalmente en la roca S02.	39
Figura 9. Zona deteriorada sobre la fachada frontal de la catedral	40
Figura 10. Daños en muro norte. A) Patrón de agrietamiento debido a la coincidencia de juntas sobre una misma línea. B) Columna circular ornamental con daños de agrietamiento y desprendimiento de la capa superficial de las piezas. C) Daños antropogénicos en muro (líneas de pintura en aerosol).....	41
Figura 11. Zonas de mayor degradación en el lado sur de la catedral. A) Zona deteriorada en la parte superior del muro generada por el deficiente sistema de drenaje en la azotea de la nave lateral. B) Fractura de la columna circular ubicada a un costado del acceso al interior del templo. C) Daños por flaking y scaling en la parte inferior de los muros debido al efecto de la humedad por capilaridad.....	42

Figura 12. Imágenes del acueducto el Cedazo. A) Tramo de acueducto con bóveda sin recubrimiento, B) Tramo de acueducto con menor deterioro en bóveda y paredes (Varela, 2005).44

Figura 13. Mapa de Villa de la Asunción (Aguascalientes) en 1786 (Madrid, 1995).45

Figura 14. Ubicación y trazo de las líneas en mapa de Google Earth (Fuentes, 2014).46

Figura 15. Modelo 1, medición de tomografía eléctrica (sur), línea de 42m (Fuentes, 2014).47

Figura 16. Fachada principal con atrio de la Catedral Basílica52

Figura 17. A) Equipo aéreo UAV-Phantom II vision quadcopter. B) Cámara Gopro Hero3+black edition y soporte (Gimbal).54

Figura 18. Imagen de pantalla capturada durante el procesamiento en Software Gopro studio.55

Figura 19. Primera etapa de nube de puntos dispersa en el procesamiento de imágenes en el software Agisoft Photoscan.56

Figura 20. Impresión de pantalla de obtención de modelo final después de realizar el proceso de creación de texturas en el software.57

Figura 21. Modelo vectorizado de la azotea de la catedral.58

Figura 22. Modelo vista de planta de la azotea de la catedral. Las figuras en azul representan las ubicaciones de la cámara.58

Figura 23. Modelo completo de la catedral creado en el programa Agisoft Photoscan.59

Figura 24. Modelo de fotogrametría de corto alcance de zona deteriorada en muro de fachada principal. A) Modelo vista lateral A-A', con profundidad máxima de desgaste de 5 cm. B) Modelo vista frontal.60

Figura 25. Modelo de fotogrametría de corto alcance de zona deteriorada en muro de fachada lateral sur. A) Modelo vista lateral A-A', con profundidad máxima de desgaste de 14 cm. B) Modelo vista frontal.60

Figura 26. Ejemplo de los diferentes tipos de mampostería, clasificación basada en las características de la sección (Quelhas, 2014). a) Muro de una hoja, b) muro de doble hoja sin conexiones, c) muro de doble hoja con conexiones, d) muro multihojas (3 capas), e) muro seco sin juntas de mortero.64

Figura 27. Condiciones de carga: “V” cargas estáticas verticales, “O” cargas estáticas y dinámicas fuera de plano, “I” cargas dinámicas dentro de plano.78

Figura 28. Afectación de una condición de carga fuera de plano para muros con una, dos y tres hojas en su sección..... 78

Figura 29. Muros con mejor ICM. A) Muro “a” de la catedral de Aguascalientes con valor de 5.04. B) Muro “c” de la catedral de Aguascalientes con valor de 5.6. C) Muro “h” de la presa de Tepezalá con valor de 5.04. 79

Figura 30. Deterioro de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes debido a la intemperización y a la humedad. A) Black crusts, soiling, scratch, áreas húmedas y humedad ascendente en la pared al lado derecho del acceso principal al templo. B) Black crusts y contaminación por residuos humanos, suciedad y humedad ascendente en el fondo de la pared en el lado derecho de la puerta de acceso. C) y D) Humedad ascendente y flaking en rocas de la pared norte..... 86

Figura 31. Imagen de la fachada de la Catedral Basílica de la ciudad de Aguascalientes. 87

Figura 32. Comparación entre las rocas originales de Barranca (A, B y C) y las rocas de reemplazo de Valladolid (D, E y F) y San Miguel El Alto (G, H e I). Las diferencias en textura y composición mineral son claras de reconocer (explicación en el texto)..... 90

Figura 33. Difractografía de rayos X de la piedra original del edificio (muestra S01) en comparación con las piedras de reemplazo (S02 y S03)..... 92

Figura 34. Vista de planta de la Catedral que muestra la ubicación de las pruebas de absorción realizadas en la Catedral. G1: pruebas en el este en la fachada principal, incluye ensayos 1 a 20; G2: pruebas en las paredes inferiores del norte, incluye ensayos 21 a 28; G3: pruebas en las paredes inferiores del sur, incluye los ensayos 29 a 39; G4: prueba en la torre sur, incluye ensayos 39 a 43; G5: pruebas en la torre norte, incluye ensayos de 43 a 45; Y G6: pruebas en la pared superior, incluye ensayos de 45 a 48. ... 93

Figura 35. Ensayo de absorción realizado sobre las piedras de los muros de mampostería de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes. El procedimiento de campo para el ensayo incluyó: colocación del tubo de Karsten sobre la superficie de la roca, llenado de la pipeta con agua destilada, medición del nivel de agua a 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 y 30 minutos. ... 94

Figura 36. Prueba de capacidad de absorción de agua "in situ" para las muestras S02, S04, S05 Y S06. Kmin, kmax y kL (ml / min) son el coeficiente de absorción mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio..... 98

Figura 37. Capacidad de absorción de agua (Water absorption capacity) en la prueba de laboratorio para las muestras S01, S04 y S05. Kmin, kmax y kL (ml / min) son el

coeficiente de absorción mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio.99

Figura 38. Captación de agua por capilaridad obtenida en las cuatro muestras: (a) S01, (b) S03, (c) S04 y (d) S05. AWmin, AWmax y AWavg son el coeficiente de absorción de agua mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio. La línea gruesa es la línea de tendencia media en cada muestra.100

Figura 39. Distribución del tamaño de poro y porosidad total de las piedras. a) S01, b) S02 y c) S03.101

Figura 40. Gráficos de degradación de la piedra por cristalización de sal para las muestras S01, S03, S04 y S05.102

Figura 41. Grafica de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982).114

Figura 42. Muros de mampostería estudiados. (A) muro 1, (B) muro 2.116

Figura 43. Prueba automática ERT en muro 1 mediante el sistema de acero para la colocación y fijación de electrodos.117

Figura 44. Modelo de la sección del muro 1, resultado de las mediciones automáticas por ambos lados y unidos por interpolación lineal. a) Sección de muro estudiado vista de planta basada en las imágenes de las paredes para la proyección de las juntas con una estructura interna sin definir. b) Modelo de resistividad interpretado mediante el trazado de fronteras de piedra y proyección de juntas.119

Figura 45. Sección del muro 1. (A) Imagen de planta, (B) composición interna del muro.120

Figura 46. Perfil de la medición manual en pared frontal y pared posterior, longitud 2.30 m y profundidad de 0.40 m. a) Modelo de resistividad interpretado 1 corresponde a la medición en pared frontal. b) Sección de muro estudiado basada en las imágenes laterales de los muros para la proyección de las juntas al interior del muro. c) Modelo de resistividad interpretado 2 en pared posterior.121

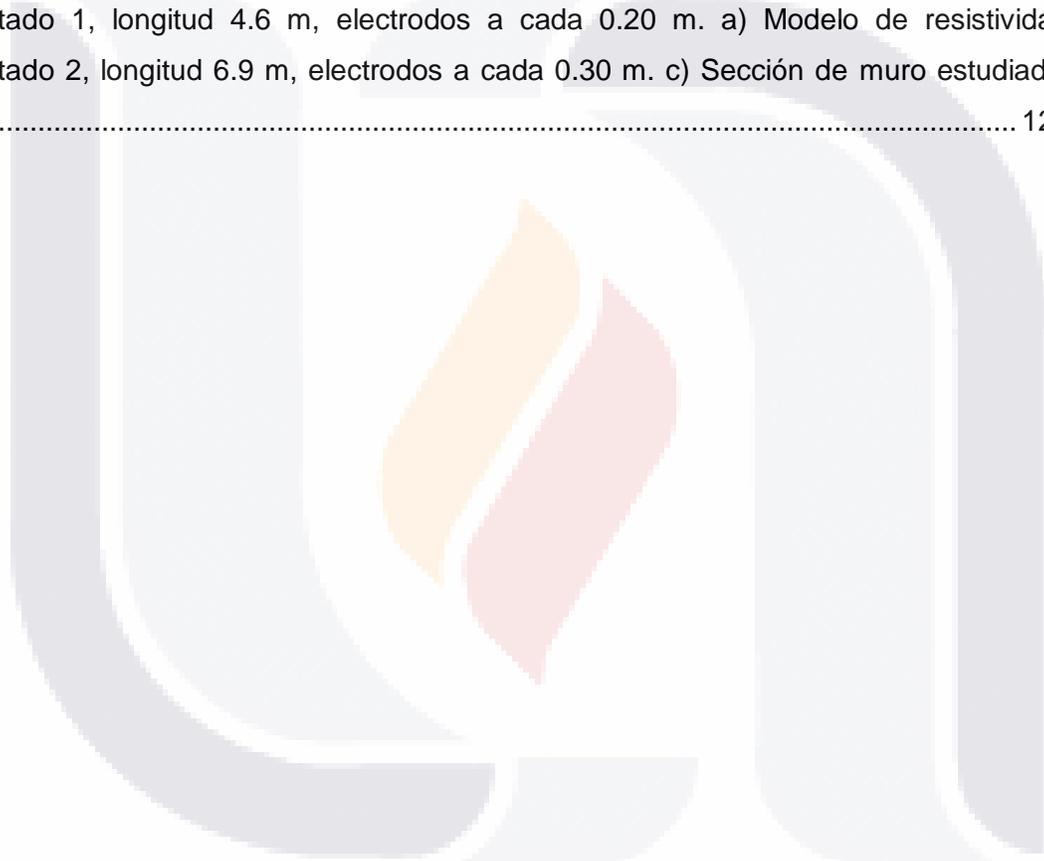
Figura 47. Medición automática de 1.15 m de longitud a una altura de 0.80 m con una profundidad de 0.20 m aprox. a) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del muro para la proyección de las juntas hacia el interior. b) Modelo de resistividad interpretado obtenido de la pared frontal.122

Figura 48. Perfil de medición automática a una altura de 1.7 m, longitud de 1.15 y profundidad de 0.20 m. a) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del

muro para la proyección de las juntas hacia el interior. b) Modelo de resistividad interpretado sobre la pared frontal..... 123

Figura 49. Perfil de medición automática, longitud de 1.15 m y profundidad de 0.20 m. En la parte inferior se muestra la imagen de la zona de medición. a) Modelo de resistividad interpretado obtenido de la pared frontal. b) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del muro para la proyección de las juntas hacia el interior. c) Imagen de la superficie medida con la ubicación de los puntos de contacto de los electrodos. 124

Figura 50. Modelos de medición manual a 1 m de altura. a) Modelo de resistividad interpretado 1, longitud 4.6 m, electrodos a cada 0.20 m. a) Modelo de resistividad interpretado 2, longitud 6.9 m, electrodos a cada 0.30 m. c) Sección de muro estudiado. 126



ACRÓNIMOS

NDT	Non Destructive Testing
GPR	Ground Penetrating Radar
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
NADRAP	Northumberland y Durham Art-Rocks
ERT	Electrical Resistivity Tomography
NDT	Non Destructive Testing



RESUMEN

En el presente documento se desarrollan una serie de procedimientos para el estudio y evaluación del patrimonio edificado. Los trabajos consisten en el reconocimiento in situ de diferentes edificios antiguos del estado, la documentación histórica y geométrica, la implementación de técnicas para la determinación de las características físicas, mecánicas, petrográficas y petrológicas de la roca, así como el desarrollo de ensayos no destructivos para la obtención de las propiedades geométricas internas y detección de irregularidades en los muros de mampostería, con el objetivo de proponer una metodología que contribuya en el conocimiento a detalle de la edificación y en la generación de información necesaria para llevar a cabo intervenciones estéticas y estructurales adecuadas para la conservación y preservación del patrimonio edificado. Esta metodología tiene como objeto de estudio la Catedral Basílica de Aguascalientes de “Nuestra señora de la Asunción” que es el edificio más importante de la ciudad. Con la metodología desarrollada se logra la recopilación de datos históricos de la catedral de Aguascalientes, el reconocimiento de las condiciones actuales e identificación de las principales zonas de deterioro, la obtención de las propiedades mecánicas a partir de datos cualitativos, el conocimiento de datos característicos de la piedra, así como propiedades internas de los muros de mampostería y detección de zonas de deterioro y discontinuidades que podrían afectar las condiciones de seguridad estructural del edificio.

Patrimonio edificado, ensayos no destructivos, propiedades geométricas internas, Catedral Basílica de Aguascalientes, seguridad estructural del edificio.

ABSTRACT

In this document a series of procedures are developed for the study and evaluation of the heritage building. The works consist of the in situ recognition of different old buildings of the state, historical and geometric documentation, the implementation of techniques for the determination of the physical, mechanical, petrographic and petrological characteristics of the rock, as well as the development of non-destructive methods to obtain the internal geometric properties and detection of irregularities in the masonry walls, with the aim of proposing a methodology that contributes to the detailed knowledge of the building and the generation of information necessary to carry out aesthetic and structural interventions suitable for the preservation and preservation of the built heritage. This methodology has as object of study the Cathedral Basilica of Aguascalientes of "Nuestra señora de la Asunción" that is the most important building of the city. With the developed methodology it is achieved: the collection of historical data of the cathedral of Aguascalientes, the recognition of the current conditions and identification of the main zones of deterioration, the obtaining of the mechanical properties from qualitative data, the knowledge of data characteristic of stone stone, as well as Internal properties of masonry walls and detection of areas of deterioration and discontinuities that could affect the structural safety of the building.

Heritage building, non-destructive testing, internal geometric properties, Cathedral Basilica of Aguascalientes, structural safety of the building.





CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La importancia del patrimonio cultural radica en ser uno de los elementos que configura la memoria colectiva que da cohesión y constituye la identidad de la sociedad mexicana, razones por las que el Estado ha asumido su protección, estableciendo distintos mecanismos para su conservación mediante la conformación de políticas culturales y marcos jurídicos que garanticen su protección, cuidado y difusión.

En el estado de Aguascalientes, de acuerdo a datos del INAH existen 114 monumentos históricos en 9 diferentes municipios. Estos edificios se deterioran con el paso del tiempo debido a efectos de degradación como: factores de intemperismo (agua, sol, lluvia, viento), exposiciones a guerras históricas, intervenciones sin previo análisis del edificio y a la negligencia de la sociedad. De manera que el diagnóstico de edificios históricos presenta retos importantes, como por ejemplo la determinación de su grado de deterioro o afectación. Lo anterior debido a varios factores como son: la complejidad de su geometría, la alta variación de las propiedades de los materiales tradicionales, las diferentes técnicas de construcción utilizadas, el mínimo conocimiento de los daños que presenta, y demás acciones perjudiciales en las construcciones a lo largo de su vida. La rehabilitación de los edificios antiguos de mampostería se ha vuelto un tema de gran interés, dada la creciente necesidad de proteger y restaurar la seguridad y la funcionalidad del patrimonio edificado.

1.1.1 Planteamiento del problema de investigación

¿Sería razonable operar a un enfermo sin tener constancia objetiva del mal que adolece?, en ese caso ¿por qué intervenimos en nuestra herencia cultural edificada sin tener conocimiento de las causas desencadenantes de sus procesos de deterioro?. Respondiendo a la cuestión formulada, las intervenciones en las construcciones antiguas, dada su fragilidad, requieren precisión, detalle y formación especial en el desarrollo de un estudio previo riguroso de diagnóstico que dé soporte a las decisiones sobre las técnicas de intervención que deben adoptarse (Lombillo, 2010).

Regularmente, las propuestas de conservación de edificios patrimoniales parten de un análisis de las características externas mediante una inspección visual de las patologías que los afectan. La inspección visual se apoya en mediciones de las dimensiones de los

elementos arquitectónicos con equipos de precisión para determinar la geometría del edificio. Sin embargo, los resultados de estos análisis visuales no proporcionan datos sobre la configuración “interna” de los sistemas estructurales (muros, embovedado, contrafuertes etc.) ni de sus características mecánicas o del estado de degradación, solo proporcionan datos que contribuyen en la elaboración de propuestas de conservación para restablecer la apariencia estética (ver figura 1).



Figura 1. Trabajos de restauración en edificio histórico

Una de las principales dificultades para determinar la composición interna de los sistemas estructurales de edificios patrimoniales, y las características mecánicas y petrofísicas de los materiales que los componen, es la restricción de extraer probetas de material para su caracterización en laboratorio, así como la limitante de la implementación de sondeos directos exploratorios (pozos o calas de observación) para determinar la composición interna de los elementos estructurales, patologías “internas” y grados de deterioro.

Lo anterior conduce a la necesidad de caracterizar tanto los sistemas estructurales como los materiales, mediante técnicas que no afecten la integridad de los edificios patrimoniales. Estas técnicas son llamadas pruebas no destructivas y consisten de realizar mediciones de algún parámetro físico del material desde la superficie del

elemento estructural. Estas técnicas son de uso cotidiano en la exploración del subsuelo en donde la disciplina que las emplea es conocida como geofísica. Otras técnicas que pudieran ser de utilidad en la caracterización de los materiales con que está construido un edificio, son las utilizadas también en la caracterización de los materiales rocosos de la corteza terrestre, es decir las técnicas geológicas. En edificios históricos estas técnicas se pueden utilizar para determinar características petrofísicas (propiedades físicas, químicas, mineralógicas y espaciales de los materiales). Las técnicas para determinar las propiedades petrológicas son una herramienta básica para el análisis del principal elemento que compone los edificios de mampostería, la piedra. El determinar el comportamiento estructural de un inmueble de estas características es complejo debido a la heterogeneidad que presenta el material con que está construido. Sin embargo, el conocimiento a detalle de las características físicas y mecánicas de la piedra empleada en mayor porcentaje en la construcción permite lograr una mejor aproximación al comportamiento real del edificio.

En el estudio de edificios históricos con fines de determinar su seguridad estructural para la toma de decisiones en cuanto a su conservación, una de las tareas a realizar es la determinación de la geometría del edificio, lo cual se consigue mediante un levantamiento de las dimensiones, usualmente realizado con equipos de topografía que pueden proporcionar datos con precisión milimétrica. Los datos así levantados proporcionan la geometría (ancho, largo, alto, etc.) de los muros, arcos, bóvedas y en general de todos los elementos estructurales. Sin embargo, la manera en que los materiales están integrados, es decir el sistema constructivo “interno” de dichos elementos influye en su comportamiento estructural. Un muro de similares dimensiones y construido con los mismos materiales puede tener un comportamiento diferente dependiendo de cómo se integraron sus partes, es decir, dependiendo del sistema constructivo empleado.

De lo anterior se desprende que un modelo numérico que pretenda representar el comportamiento de un edificio histórico, debe considerar además de la geometría del edificio, la “geometría interna” de los elementos estructurales, así como la composición y propiedades de los principales elementos constructivos, para que represente de manera fidedigna el comportamiento estructural del edificio.

Se entiende como composición interna de un sistema estructural el tipo de materiales que lo integran. Se entiende como geometría interna de un sistema estructural la disposición o arreglo de los diferentes materiales que lo componen.

1.2 Hipótesis

Es posible hacer una evaluación técnico-constructiva de edificios históricos de mampostería de piedra, mediante la aplicación de una metodología que integre las diferentes etapas constructivas, las condiciones actuales de los materiales, las características geométricas internas y externas de los sistemas constructivo-estructurales del edificio, que sirva para la mejora del análisis estructural del edificio al traducir factores cualitativos a valores cuantitativos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para la evaluación de los edificios históricos de mampostería de piedra en la que se tome en cuenta la historia, la condición actual, las características geométricas internas y externas, el análisis de materiales, utilizando técnicas no destructivas y correlacionales de parámetros cualitativos con cuantitativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar edificios históricos de la región para catalogar sistemas constructivos de mampostería para identificar sus características geométricas y tipos de materiales usados.
- Tomar como caso de estudio el templo de la Catedral Basílica de Aguascalientes para dar elementos para su análisis estructural.
- Determinar las dimensiones de elementos estructurales (muros de carga) del templo tomado como caso de estudio.
- Identificar y clasificar los diferentes tipos de mampostería empleados, las etapas de construcción y las diferentes áreas del templo.
- Caracterizar las rocas de los muros de catedral para determinar las propiedades físicas, mecánicas, petrofísicas y petrológicas.

- Desarrollar y/o adaptar métodos no destructivos para la caracterización in situ de materiales y sistemas constructivos de edificios patrimoniales.

1.4 Metodología

Para llevar cabo los objetivos planteados se realizaron una serie de procesos durante varias etapas:

En primer lugar llevó a cabo la búsqueda de literatura relacionada con el tema de investigación. Se revisaron libros en físico, artículos de investigación digitales de la biblioteca virtual de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, revistas, documentos obtenidos del archivo histórico, referentes a los temas del patrimonio edificado en el país, antecedentes de los edificios históricos del estado de Aguascalientes sobre todo de la Catedral Basílica de la ciudad, elementos arquitectónicos y estructurales de edificios históricos, sistemas constructivos en muros de mampostería, propiedades de la piedra y procesos de deterioro, así como, el empleo de métodos no destructivos en el patrimonio edificado, realizando una documentación exhaustiva del último tema.

En una segunda etapa se realizó la visita a haciendas y construcciones antiguas del estado de Aguascalientes, con el objetivo de realizar una inspección visual, así como la obtención de fotografías que proporcionaran datos para el análisis de los materiales y sistemas constructivos, al igual que la determinación de la geometría externa e interna del inmueble. Se llevó a cabo un trabajo de identificación de los diferentes tipos de mampostería empleados, las etapas de construcción y los espacios del edificio, basados en fotografías, en la información histórica, en planos existentes e información generada de la implementación de la técnica fotogramétrica. Se implementó la fotogrametría aérea y terrestre con la finalidad de crear modelos digitales en 3D de la catedral de Aguascalientes. La fotogrametría aérea se realizó por medio de un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés), llamado comúnmente como dron.

La tercer fase consistió en la revisión de las condiciones actuales de la catedral. Se hizo una descripción de las condiciones de deterioro a partir de un levantamiento para la identificación de las zonas de con mayores daños y la detección de los diversos tipos de patologías presentes en los materiales, así mismo, se estudiaron las posibles causas del deterioro en las zonas más expuestas a daños. El objetivo de este trabajo fue conocer la

problemática actual del edificio en términos de deterioro, e iniciar un proceso de monitoreo de la evolución de daños a través del tiempo.

En la cuarta etapa se desarrollaron las pruebas “in situ” y en laboratorio sobre muestras de roca para la obtención de las propiedades petrofísicas y petrológicas. Las pruebas empleadas fueron la prueba de absorción mediante el tubo karsten, prueba de intrusión de mercurio, prueba de absorción por capilaridad, prueba de inmersión en agua, análisis de difracción de rayos X y la prueba de cristalización de sales. De estas pruebas se determinaron parámetros tales como: índice de absorción de agua, velocidad de absorción, densidad, porosidad y tasa de deterioro de la roca.

En una quinta etapa se llevó a cabo la determinación de las propiedades cuantitativas mediante el método propuesto por Borri para la obtención de un índice de Calidad de Mampostería a través de datos cualitativos. El objetivo de llevar a cabo este proceso fue el de obtener datos mecánicos previos de forma rápida para entender las diferentes condiciones de esfuerzo de los elementos estructurales de mampostería.

En la sexta etapa se desarrollaron ideas para la adecuación del Método no Destructivo de Resistividad Eléctrica en el patrimonio edificado. Se fabricaron una serie de dispositivos para la adaptación de un resistivímetro utilizado en el campo de la Geofísica para la obtención de las propiedades del subsuelo, con la finalidad de implementarlo en edificios históricos. El método de resistividad eléctrica con el equipo adaptado se implementó en algunos muros de mampostería de la ciudad de Aguascalientes, así como en las paredes de la fachada de la catedral con el objetivo de obtener datos geométricos internos, oquedades y concentraciones de humedad que representen un riesgo en la estabilidad del edificio.

Finalmente, en una séptima etapa se discute la viabilidad de la metodología propuesta con base en los resultados obtenidos, se mencionan los alcances y limitaciones del método, así como las líneas de investigación a las que se dará seguimiento para mejorar o complementar el trabajo realizado.





CAPÍTULO 2
ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO

CAPÍTULO 2. ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción

Los edificios históricos de mampostería de piedra en México reflejan una problemática de deterioro e inestabilidad, propiciando lugares inseguros para la sociedad. Las dependencias de gobierno muestran limitados ante esta situación ya que los programas de rehabilitación generalmente se enfocan en mejorar las condiciones estéticas, sin embargo se dejan a un lado las cuestiones estructurales del inmueble, convirtiéndose en recintos poco seguros para la sociedad. En el caso de la ciudad de Aguascalientes existen varios edificios con un alto valor cultural e histórico que requieren ser atendidos, tal es el caso de la catedral de Aguascalientes y el templo de San Antonio. Es necesario desarrollar una metodología basada en pruebas no destructivas o poco destructivas que afecten de forma mínima las condiciones del inmueble, así como herramientas, equipo y especialistas necesarios para conocer las condiciones reales del edificio y las características físicas, mecánicas, geométricas y de deterioro, que contribuyan en el mejoramiento de las condiciones y prolonguen la vida de servicio de los edificios.

Previo a abordar los temas relacionados con el trabajo de investigación es necesario conocer y aclarar algunos conceptos y temas importantes que ayudan a comprender la importancia del patrimonio edificado en la sociedad actual, estos temas son: patrimonio edificado, monumento y la importancia de la valoración del patrimonio edificado.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Definiciones

2.2.1.1 Patrimonio edificado

Es el conjunto de bienes heredados del pasado y en consecuencia el patrimonio arquitectónico puede definirse como el conjunto de bienes edificados, en los cuales la sociedad atribuye o reconoce un valor cultural. Este concepto de patrimonio edificado es limitado ya que a través del tiempo se han generado una serie de cambios en los valores culturales, de manera que se considera una definición dinámica y susceptible de modificaciones o adiciones al concepto (Azkarate et al., 2003).

El patrimonio arquitectónico se constituye de edificios monumentales y singulares como por aquellos modestos y sencillos que caracterizan y dan identidad a la sociedad. Como parte de la ciudad, el patrimonio edificado configura zonas urbanas de carácter histórico que, en muchos casos, aún conservan su calidad como centros urbanos generadores, concentradores y conductores de las actividades económicas a escala local y regional (Hernández, 2006). De manera que los procesos de conservación del patrimonio edificado no solo se limitan a mantener en pie y conservar las propiedades físicas del inmueble, sino también a lograr su inserción en la vida económica, social de forma funcional. Patrimonio edificado es un concepto que nace y se sustenta en lo público, por lo cual corresponde a este ámbito establecer condiciones propicias para que los inmuebles de propiedad privada mantengan esa múltiple vigencia que garantice su conservación (Mercado, 2011).

2.2.1.2 Monumento

Vitruvio lo consideró como un esfuerzo para lograr la calidad en la arquitectura de modo que asumiera un carácter de testimonio que honre la memoria del autor.

Según Carlos Chanfón Olmos en su libro fundamentos sobre la restauración en (México, 1983), “el monumento es todo aquello que puede representar valor al conocimiento de la cultura del pasado histórico, considera también que el concepto debe citarse entre los polos, evitando la posición entre solo lo extraordinario es monumento y absolutamente toda obra es monumento”.

En la carta de Venecia se menciona otro de los conceptos más usados y completos:

“La noción de monumento comprende la creación arquitectónica aislada así como también el sitio urbano o rural que nos ofrece el testimonio de una civilización particular de una fase representativa de la evolución o progreso, de un suceso histórico. Se refiere no sólo a las grandes creaciones sino igualmente a las obras modestas que han adquirido con el tiempo, una significación cultural”.

El patrimonio cultural de México está constituido por bienes tangibles e intangibles, muebles o inmuebles, públicos como privados, que son dignos de conservarse por sus valores históricos, artísticos, técnicos, científicos o tradicionales. En particular en México

se toma mayor importancia en sitios o inmuebles de uso público, no así las edificaciones particulares están siendo abandonadas tanto por el propietario como por el INAH, la cual es la institución encargada de la preservación y mantenimiento de los inmuebles. Aun cuando las edificaciones son catalogadas por el INAH, no significa que se emplearon recursos para su protección y conservación.

La conservación del patrimonio edificado de propiedad privada se inscribe en la dicotomía de lo público y lo privado, al incluir bienes que, inmersos en el mercado inmobiliario, a la vez se consideran un bien público, lo cual, aunado a su significado como elemento de identidad y cohesión social, y generador de beneficios económicos, ha justificado la intervención del Estado, no siempre exitosa, para su conservación y aprovechamiento (Mercado, 2011).

El aprovechamiento del patrimonio edificado para el desarrollo, en especial a través del turismo, ha llevado a desarrollar conceptos y estrategias como la gestión del patrimonio cultural, entendida como el «conjunto de actuaciones programadas con el objetivo de conseguir una óptima conservación de los bienes patrimoniales y un uso de estos bienes adecuado a las exigencias sociales contemporáneas, sin menoscabo de su preservación ni su valorización social» (Ballart y Treserras, 2001).

2.3 Importancia de la valoración del patrimonio edificado

El patrimonio arquitectónico es considerado importante ya que es uno de los principales vestigios del pasado, así mismo el valor histórico y simbólico se transforma en un sentimiento de identidad.

El tema de la conservación del patrimonio edificado es relevante, ya que actualmente la cultura es considerada una «variable fundamental para explicar las pautas de cambio y esencia misma del desarrollo sostenible» (Pérez, 1997), es por ello que las manifestaciones tangibles e intangibles son valoradas y preservadas por la sociedad para su estudio, además de establecerse como un elemento simbólico y de identidad. El patrimonio edificado se integra de un conjunto de expresiones materiales en las que se encuentran las edificaciones, plazas, calles, trazas y parcelarios que configuran ciudades y poblaciones. Este patrimonio, además de su valor simbólico, tiene un valor económico

que lo hace susceptible a las imperfecciones del mercado (Klamer y Zuihdhof, 1998). Lo anterior, aunado a la insuficiencia de recursos para su protección y conservación, su naturaleza pública, la valoración social y su capacidad para generar amplios beneficios económicos, justifica la intervención reguladora del Estado, pese a lo cual las políticas públicas para su protección han mostrado una limitada efectividad, sobre todo en países en vías de desarrollo (Krebs y Schmidt-Hebbel, 2002).

El aprovechamiento del patrimonio edificado para el desarrollo, en especial a través del turismo, ha llevado a desarrollar conceptos y estrategias como la gestión del patrimonio cultural, entendida como el «conjunto de actuaciones programadas con el objetivo de conseguir una óptima conservación de los bienes patrimoniales y un uso de estos bienes adecuado a las exigencias sociales contemporáneas sin menoscabo de su preservación ni su valorización social» (Ballart y Treserras, 2001).

No obstante consideramos que, atendiendo a la naturaleza pública del concepto de patrimonio cultural, la protección y aprovechamiento del mismo debe ser analizada bajo la visión más amplia y específica de la actuación del ámbito público, como son las políticas públicas, que además incluyen la gestión pública o privada de ese patrimonio. La observación de las políticas para la protección del patrimonio cultural en diversos países ha permitido su clasificación en: 1. Definición del patrimonio cultural. 2. Intervención pública directa a través de la propiedad pública del patrimonio y el gasto en su adquisición, mantenimiento y gestión. 3. Limitaciones legales al derecho de propiedad privada de patrimonio cultural. 4. Incentivos económicos del Estado al incremento del patrimonio cultural y a su protección por el sector privado. 5. Privatización de propiedad o gestión del patrimonio. 6. Educación (Krebs y Schmidt-Hebbel, 2002).

Según Acosta (2010) en su estudio Requiem por un Centro Histórico: el Patrimonio en Ciernes de Aguascalientes, con base en algunos planos y referencias catastrales comprueba que existe una continua pérdida de patrimonio edificado el cual repercute en el detrimento de la identidad cultural. Esta pérdida de los principales testimonios de la historia se refleja principalmente en el área del centro histórico de la ciudad con la demolición del interior de las fincas.

Las mayores pérdidas se han tenido en los últimos tres lustros, la ciudad ha experimentado múltiples intervenciones en el centro histórico. Según datos del INAH,

Aguascalientes contaba con 459 monumentos históricos que significan 162,837.10 m² y 191 fincas artísticas con 35,711.60 m², dando un total de 650 obras de arquitectura, con un 29% de construcciones del siglo XX.

Es claro que la pérdida o deterioro del patrimonio edificado es cada vez más notorio, generándose polémica y cuestionamientos sobre la lucha por la permanencia de estos sitios. Según algunos autores (Capel, 1996; García, 2004; Acosta, 2010), una de las principales formas de deterioro es el desuso, sin embargo retomar este tipo de sitios y hacer las reparaciones pertinentes representa altos costos y un constante mantenimiento, por lo que los propietarios de los inmuebles optan por destruir o conservar los inmuebles para darles un uso comercial, transformando así el edificio sin respetar la esencia misma del patrimonio.

Un papel importante en esta transformación temporal y física, lo tiene el estado, ya que son garantes principales de la identificación, conservación y gestión del sitio, no solo recuperando la herencia histórica, sino además generando una riqueza económica, social y cultural a todo su entorno, lo que significa proyectos de restauración viables y atractivos económicamente, además de contribuir en el aspecto sociocultural del país (Ettinger y De Anda, 2014).

El patrimonio arquitectónico de la ciudad de Aguascalientes es de siglos recientes, tal es el caso de la catedral de Aguascalientes que data del siglo XVIII. La juventud de los edificios se refleja en las buenas condiciones en la mayoría de los inmuebles de mayor importancia para la ciudad, sin embargo a través del tiempo, el deterioro por intemperización y humedad tienen un mayor impacto, sin agregar afectaciones antropogénicas y los problemas de subsidencia generados por la extracción del agua del subsuelo, este último aspecto atenta contra las condiciones de seguridad de los edificios, poniendo bajo la lupa y en constante monitoreo la situación de los inmuebles. Lo anterior, deja en claro la necesidad de revalorizar el patrimonio edificado, así como también la implementación de esfuerzos múltiples que contribuyan en la evaluación de las condiciones actuales para la toma de decisiones que tenga como objetivo principal la conservación del patrimonio edificado.



CAPÍTULO 3
HISTORIA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES

CAPÍTULO 3. HISTORIA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES

3.1 Etapas de construcción de la catedral.

La documentación del patrimonio cultural puede definirse como (Georgopoulos and Loannidis, 2004): la acción de la adquisición, procesamiento, presentación y grabación de los datos necesarios para la determinación de la posición, forma y tamaño de un monumento en un espacio de tiempo determinado.

La revisión histórica de la Catedral Basílica de Aguascalientes es de suma importancia para llevar a cabo el trabajo de investigación en el desarrollo de una metodología que contribuya en la evaluación del patrimonio edificado. Este tema marca las pautas de la investigación ya que aporta datos como:

- a) Los orígenes de la obra. Se mencionan las fechas de origen del templo, desde el inicio de la obra hasta su inauguración.
- b) Las diferentes etapas de construcción.
- c) Las modificaciones o intervenciones de consideración que afectaron de forma positiva o negativa las condiciones de la catedral.
- d) La mano de obra que intervenía en cada uno de los procesos.
- e) La complejidad económica, técnica y social que involucraba las etapas de construcción.

El conocimiento de los datos mencionados es fundamental para la planeación de las actividades que involucra la etapa experimental, las ambigüedades pueden ocasionar una desviación de los resultados o un aumento de los trabajos por la implementación de una alta cantidad de muestreos en las pruebas. Cada una de las pruebas requiere un previo estudio de las etapas de construcción, los materiales involucrados, la ubicación de los bancos de material y las técnicas constructivas empleadas. Sin embargo, muchos datos no fueron documentados o fueron extraviados a través del tiempo. Existen comentarios relevantes de personas que conocen la historia del templo, sin embargo la mayor parte de la información es obtenida de fuentes confiables. Dos de las fuentes importantes son: la historia de la iglesia católica en Aguascalientes (Vol. 1), Parroquia de la Asunción, de José Antonio Gutiérrez; y La catedral y su cabildo, de Ricardo Corpus.

Se tiene registro, que la primera iglesia estuvo en uso por 50 años, es decir hasta 1621 que se constituyó la segunda iglesia parroquial. Su construcción fue referencia importante

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

para la traza de la ciudad. En el año de 1609 por orden del Lic. Gaspar de la Fuente, del consejo de su majestad, oidor de la Nueva Galicia, hace un mandato para su construcción en el que especifica el lugar donde debía ser edificada. La segunda iglesia tenía una amplia capacidad y prestó servicio durante 110 años.

Una tercera iglesia parroquial tiene sus orígenes en el año de 1704 con el cura Antonio Flores de Acevedo. Debido a la economía que se vivía en los inicios del siglo, la construcción se desarrolló muy lentamente, tan lento que pasaron cuatro curas y el templo no presentaba avances significativos, no se tienen registros si la lentitud de la construcción se debía al desinterés por creación de un nuevo espacio religioso o a la falta de recursos. Con la llegada del D. Manuel Colón de Larreategui en 1733, uno de los principales objetivos fue la culminación del templo parroquial. Mediante un gran esfuerzo, con la recolección de limosnas en especie por las haciendas, en febrero de 1735 se reanudó la obra, empleando indios en la extracción y acarreo de piedra y cal, pagando solamente trabajos de albañilería y cantería, así como otro tipo de trabajos especializados. Se concluyó en el año de 1738 con los trabajos en el cañón, cruceros y bóvedas. Existen escasas referencias sobre gastos y avances de obra, solo encontramos mención en testamentos, así mismo no existen registros que mencionen quien fue el director o maestro de obra, se menciona que Juan García Castañeda, Joaquín Rodríguez y Manuel el Rico, intervinieron en la dirección. En la ejecución de los trabajos de ornato, retablos y altares se tuvo la intervención de Juan García Castañeda y Manuel el Rico, padre (Gutiérrez, 1999).

De igual manera, no existen archivos que describan la serie de trabajos realizados en el exterior de la iglesia, solo se preservan una serie de libros que explican el desarrollo del interior del inmueble. La fachada exterior se integra de estilos y agregados diversos por la intervención de varios autores. El padre Corpus hace la descripción siguiente: "Presenta un conjunto de retablos de tres cuerpos en estilo barroco-salomónico, terminado todo en forma clásica de trapecio. La sostienen dos columnas a cada uno de sus lados que sirven a su vez de marco a las estatuas de cantería que ciñen los dos primeros cuerpos. En el interior se abre la portada elaborada con arco de medio punto con sobrios capiteles a los que adornan labrados de guirnalda y rosetones. Cada cuerpo es coronado con un amplio cornisón, bajo el cual surgen grupos en alto relieve, de cantores o devotos (Gutiérrez, 1999).

En el año de 1761, el cura Dr. D. José Mateo Arteaga inicio la obra de la primera torre de la iglesia ubicada al lado norte. Según el libro de gobierno, el 12 de marzo de 1764 se estrenó la torre de la iglesia, al igual que las esquilas del segundo y tercer cuerpo, así como la campana mayor con un peso de 110 arrobas (1265 kg aproximadamente). En la dirección de la construcción estuvo el sr. Manuel el Rico. De acuerdo con el historiador José Antonio Gutiérrez en su libro "Historia de la Iglesia Católica de Aguascalientes", menciona que el periodo de ejecución destinado en la torre fue de 1 año y 20 días, por lo que no coincide en la fecha de inicio con el dato del sr. Alejandro Topete, sin embargo la fecha de término corresponden. De acuerdo al inventario realizado en 1787, la iglesia cuenta con una torre con tres cuerpos, con 56 varas de alto, y 12 arcos, 10 de los arcos con balcones de fierro y los otros dos arcos sin balcones.

Se hacen unas serie de descripciones en los documentos históricos basados en varias versiones hechas por personas especialistas en el tema, sin embargo de manera oficial, un antecedente de construcción de cada una de las etapas y de los sistemas constructivos empleados.

En un segundo inventario, uno de los datos importantes que corresponden a elementos de construcción, es la mención de la torre de caracol de piedra con tres cuerpos, media naranja y linternilla.

En los registros del inventario de 1787, se plasman algunas de las características: La iglesia cuenta con sesenta y dos varas y dos tercios de vara larga, que corresponde a 52.38 m, y once varas de ancho con su crucero de ocho varas cada brazo, es decir, 9.19 m de ancho y 6.69 m por cada brazo, la nave la conforman cinco bóvedas, una en el presbítero con su cimborrio, y una en cada capilla del crucero. El piso se componía de un entablado de madera con sepulcros señalados y numerados; así mismo contaba con seis puertas y dieciocho ventanas con sus respectivas vidrieras (Gutiérrez, 1999). En este mismo inventario se menciona la existencia de 13 altares en su interior, varios de ellos pertenecían a la antigua iglesia. Importante mencionar que durante el periodo de cura León Larreategui, también se construyó una habitación para oficina o desayunador para los eclesiásticos y la casa de vivienda para el sacristán, además lo que era lugar de descanso para los predicadores lo convirtió en sacristía, dotándola de un desagüe o acueducto de bóveda hasta un pozo externo para evitar inundaciones.

En el inventario de 1832, con la entrada al curato del D. Ignacio Tello de Lomas, se tiene registro de pocos cambios, permanecían aún el altar mayor, el sagrado corazón, Nuestra señora de dolores, entre otros altares. Una de las novedades era la capilla del cementerio. En la figura 2 se muestra la imagen más antigua de la plaza de armas, obtenida de la litografía de Carl Nebel, quien se dice estuvo en México de 1829 a 1834. En la litografía se observa la columna de Manuel Tolsá, la casa que fuera de los Rincón Gallardo (hoy plaza de Gobierno), el portal de Jesús y la Catedral de Aguascalientes al fondo.



Figura 2. Imagen de la plaza de armas de la ciudad de Aguascalientes. Al fondo se observa la catedral basílica de Aguascalientes. Litografía de Carl Nebel. Recuperado de <https://elpositivoags.wordpress.com/cultura/plazaprincipal2/>

Dentro de los inventarios realizados, el inventario del 1° de marzo registra: la iglesia toda de piedra y cal, sobrada longitud y latitud, con 7 bóvedas en el cañón incluso las de la linternilla: dos en los cruceros, todas con sus remates: 18 ventanas, bautisterios y una capilla enfrente. La puerta mayor con aldabón y un cancel de madera dorado. Dos puertas de costado del mismo modo de la mayor. El pavimento del cuerpo de la iglesia todo entarimado de madera maltratado.

En el inventario de 1936, con respecto al anterior inventario, lo único nuevo es la descripción hecha del piso: “el pavimento del cuerpo de la iglesia es de ladrillo”.

Para el siglo XIX, debido a los conflictos religiosos y políticos que aquejaban al país, se llevaron a cabo obras de mínimas que tenían la finalidad de mantenimiento debido al deterioro del tiempo. Se tiene registro que en el interinato del Br. Ignacio Tello de Lomas, el Arq. Juan de Dios de la Trinidad Pérez, proyectó una importante modificación, sin embargo, debido a la magnitud del proyecto y a la falta de recurso, el proyecto no fue llevado a cabo. En el proyecto se planteaba, más que una obra correctiva, la creación de

un nuevo templo. Las autoridades eclesiásticas se concretaron a efectuar reparaciones urgentes, para evitar el incremento del deterioro en el templo, estos trabajos fueron dirigidos por el Pbro. Francisco Ruiz de Esparza (Gutiérrez, 1999).

Con la finalidad de acabar con la monstruosidad arquitectónica, además de intentar rehacer el área por moralidad y sanidad, se autorizaron trabajos de cantería y balaustrada, las cuales permanecen aún como parte del atrio. Los libros de gobierno registran, en 1939, la aprobación de gastos de la obra de cantería del atrio y dos capillas en el interior del templo: habiendo visto las anteriores cuentas pertenecientes a la compostura de la iglesia parroquial de Aguascalientes y construcción de dos capillas, con lo que se amplió el local de dicha iglesia presentada por el presbítero Francisco Ruiz de Esparza, se procedió a aprobarlos, que son 5,241 pesos, siete tres cuartillas reales. Estas obras dividieron los espacios en el interior del templo, ya que las dos nuevas capillas, ubicadas en la parte interpuesta entre el cubo de la torre y la pared de los cruceros, la de al lado del evangelio fue dedicada a la Purísima Concepción, y el lado de la Epístola de Nuestra Señora del Rosario.

Existe el registro, que el año de 1854 se autorizó importante reparación de la iglesia, sin embargo no se especifica el tipo de obra y los recursos destinados, solo se menciona que existían suficientes recursos para llevar a cabo los trabajos.

Una de las principales transformaciones o modificaciones a la catedral se realizó durante la estancia del primer obispo de Aguascalientes, el Ilmo. Sr. José María de Jesús Portugal, el cual mediante una incesante empeño en convertir las capillas adyacentes en las actuales naves laterales. Estas obras las inicio el maestro D. J. Refugio Reyes con la supervisión del P. D. Fermín Ramírez. La adaptación y acabado culminó en el año de 1911 (figura 3).



Figura 3. Imagen de la catedral basílica de Aguascalientes con la aparición de las naves laterales. Recuperado de <https://elpositivoags.wordpress.com/cultura/antiguas-fotografias-de-aguascalientes>.

Para 1942, se establecen una serie de pequeñas reformas que terminan afectando la catedral. Las modificaciones realizadas son las siguientes: se recorta el presbítero, se retira el barandal que lo dividía del cuerpo de la iglesia, se la cambia el entarimado de mezquite por el piso actual de mosaico. Las primeras modificaciones dieron paso a otras modificaciones: amplitud del ábside, unir la capilla de Lourdes con la biblioteca al cuerpo de la catedral mediante ménsulas de cantera, entre otras modificaciones.

La segunda torre, ubicada al lado sur, se comenzó a construir el 17 de junio de 1943, por iniciativa del sr. Cura del sagrario D. Felipe Morones. La construcción estuvo a cargo del Arq. Federico Mariscal, Ing. Luis Ordoñez Douglas, maestro de albañiles Mariano Ruvalcaba, y maestro de cantereros Pablo Ortega. La torre se terminó el 26 de junio de 1946.

3.2 Identificación de espacios y etapas de construcción

Este tema se basó principalmente en los antecedentes históricos en donde se plasman las diferentes etapas de construcción de la catedral. La información fue corroborada mediante la observación “in situ” con la identificación de diversos sistemas constructivos, diferencias de niveles en elementos y variaciones en las secciones de los muros. En una primer etapa se construyó la nave central mediante muros de mampostería en bruto, las torres no fueron construidas en un inicio sin embargo se dejó la base para la continuidad de las mismas por lo que no existen problemas de conexión entre ambos elementos aun cuando se emplearon diferentes sistemas constructivos. Posteriormente se construyeron varios espacios como la antesacristía, sacristía, y capilla del sagrario, en la parte posterior, continuaron las naves laterales, la capilla y zona de criptas. En la figura 4 se muestran las etapas de construcción en orden cronológico con la identificación de la estructura en diferentes colores.

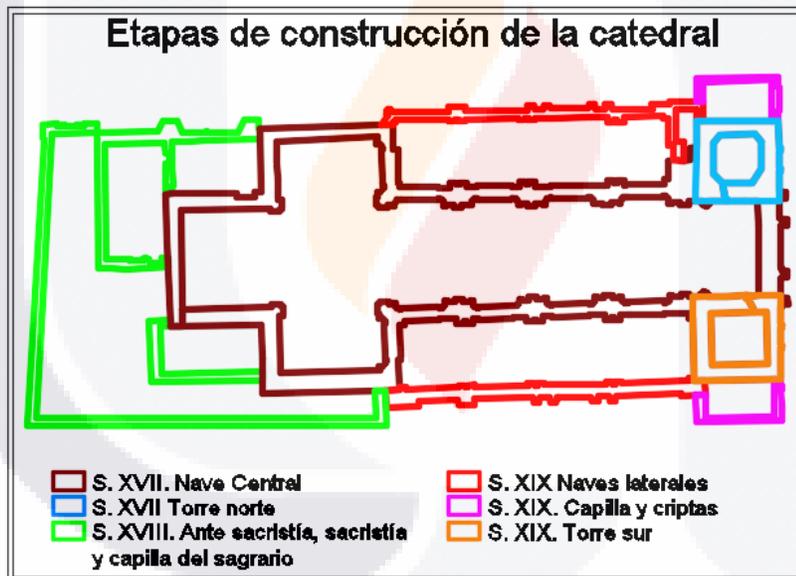


Figura 4. Plano de planta de Catedral. Identificación de etapas de construcción de acuerdo a un orden cronológico.

Se elaboró un plano en AutoCAD con el objetivo de realizar la zonificación de los espacios; estas zonas se dividen en: atrio y área de la catedral principalmente, el interior del inmueble en: sotocoro, capilla de ecce homo, zonas de criptas, bautisterio, capilla de la virgen de Lourdes, nave central, naves laterales, presbiterio, sillería, ante sacristía, capilla del sagrario, sacristía. Esta identificación de espacios, aporta datos para la

comprensión del edificio ya que se reconoce cada una de las áreas por su nombre y uso en la actualidad.

3.3 Condiciones actuales de la Catedral

La información contenida en este tema se obtiene con base en trabajo de observación en sitio para el reconocimiento de las condiciones actuales de la catedral, dando seguimiento a los sucesos e intervenciones estéticas o estructurales llevadas a cabo. Se revisa también, información en periódicos o revistas digitales relacionadas con la catedral. Así mismo, se recaba información de una entrevista informal realizada a la Arquitecta Leonor Martínez; de la entrevista se obtienen datos de las series de intervenciones hechas en los últimos años y los trabajos realizados para mitigar el deterioro y mejorar las condiciones del edificio, menciona la problemática que enfrenta aún la catedral, y algunas complicaciones con las que se han enfrentado durante los trabajos. Facilita además, una gran cantidad de fotografías de las restauraciones. La información desarrollada a continuación forma parte de la justificación del tema de investigación, la catedral empieza a mostrar signos de degradación y problemas de asentamientos que ponen en riesgo la seguridad estructural de edificio.

En el año 2012 la catedral de Aguascalientes comenzó a mostrar importantes daños debido a asentamientos generados por movimientos en el subsuelo debido a causa de la humedad y presencia de oquedades (criptas) (figura 5), según el informe presentado por el Ing. Juan Fuentes de las mediciones de geofísica empleando el método de resistividad eléctrica y GPR. Los principales problemas estructurales generados por los asentamientos son: generación de grietas en la cúpula del área afectada, así como una serie de grietas en la torre norte (figura 6). Aunado a lo anterior, las paredes exteriores muestran deterioro a causa de los efectos del intemperismo y humedad, este deterioro se hace más notorio principalmente en la nave mayor, ya que pertenece a la primera etapa de construcción de la iglesia.



Figura 5. Problemas de asentamiento en el piso de catedral a un costado del presbitero. A) Diferencias de nivel de piso antes de los trabajos de excavación. B) Trabajos de contención y estabilización de suelo durante excavación de zona con mayores asentamientos.



Figura 6. Afectaciones debido a problemas de asentamientos. Presencia de grietas en la cúpula lateral a la zona de mayor hundimiento.

En general, según las observaciones realizadas, el edificio se mantiene en buenas condiciones. Las principales zonas de deterioro se encuentran en el primer metro de los muros debido al permanente estado de humedad del muro por el efecto de capilaridad del

agua y en la parte de la azotea debido a la exposición directa a la intemperización y retención del agua de lluvia, lo cual acelera el deterioro de los elementos.

Se tiene registro, del año 2012 a la actualidad, de un constante mantenimiento que incluye desde intervenciones estéticas menores hasta intervenciones de tipo estructural, principalmente trabajos de limpieza, resane de grietas, resane de piezas, reemplazo de piezas dañadas, relleno de juntas de mortero-cemento-arena en las zonas de mayor deterioro, relleno de concreto en oquedades en el subsuelo y construcción de elementos de contención para estabilización del suelo (figura 7).



Figura 7. Trabajos de restauración en la torre norte de la catedral. A) Estructura de andamios colocados para la ejecución de los trabajos. B) Colocación de pieza nueva de cantera sobre moldura.

3.4 Levantamiento de las patologías de la Catedral

Dentro de la revisión de las características de los elementos que integran el edificio, el reconocimiento de las patologías es de particular interés. El entendimiento del edificio en su totalidad parte de la comprensión de cada uno de sus elementos, por lo que es necesario ubicar las zonas de mayor daño en el templo para después monitorear y describir la evolución de las patologías a través del tiempo. Se requiere estudiar el origen del deterioro ya que ayudan en la comprensión de la interacción de los elementos con los factores externos. El reconocimiento de las características se llevó a cabo tanto “in situ” mediante una revisión detallada, así como trabajo en computadora en la observación de fotografías y procesamiento de datos, que permita identificar daños e intensidades de las

patologías. Uno de los métodos empleados para la identificación de las anomalías es el método de mapeo. En la figura 8 se llevaron a cabo tres tipos de mapeos sobre el muro de fachada principal de la catedral al lado derecho: el mapeo litológico, el mapeo de daños y el mapeo de intensidad de daños. Cada uno de los mapeos se elaboraron por separado para después superponerse en la misma imagen y lograr la identificación de los tipos de roca según el color y las propiedades físicas, además de poder ubicar las zonas con mayor deterioro y detectar el tipo de roca más susceptible al desarrollo de patologías. Durante el mapeo litológico se identificaron cuatro tipos de rocas: S01 en tonos de rosa intenso, S02 en tonos de rosa neutro, S04 en tono de morado y S05 en tonos de blanco. El color de las piedras, en especial de las puestas en obra, puede variar con el tiempo; esto es consecuencia de su exposición a la intemperie, en particular de la acción del agua, de los contaminantes atmosféricos y de la insolación. En este sentido el color puede ser utilizado como indicador del nivel de alteración alcanzado por la piedra y, a veces, de la contaminación del ambiente. Además, los tratamientos de conservación de la piedra pueden provocar cambios de color, por lo que la determinación de sus diferencias de gran interés (Esbert et al., 1997). La descripción y nombres de las patologías se realizaron con base en el Glosario Ilustrado en Patrones de Deterioro de la Piedra creado por el ICOMOS, en este glosario se establecen términos en inglés adecuados y específicos para cada una de los problemas en la piedra, así mismo explican las características en cada tipo de patología, además menciona las diferencias entre ellas. Es de mencionar que una gran cantidad de daños en la piedra se deben a la humedad, lo que provoca reacciones químicas, modificaciones en el comportamiento mecánico y físico.



Indetificación	
Color	Nombre
	S01
	S02
	S04
	S05

Figura 8. Mapeo litológico de daños y de intensidad de daños sobre el muro de mampostería de la fachada de la catedral de Aguascalientes. Se identifican cuatro tipos de roca: la roca S01, S02, S04 y S05. La zona con mayor intensidad de daños se ubica en el primer metro y medio del muro generándose principalmente en la roca S02.

Una serie de patologías se hacen presentes, los principales efectos de degradación son: *flaking* como una etapa temprana de *delamination* o desprendimiento de material, *scaling* generándose con mayor intensidad de forma paralela a los planos de camas que conforman el elemento y en menor grado de forma perpendicular a los planos; *alveolization* debido al desprendimiento de líticos y pómez; presentan también problemas de *colouration* debido a la alta cantidad de minerales contenidos en las rocas cambiando de colores neutros a café, rojo o naranja; de igual forma problemas de *splitting* en elementos orientados en forma vertical y fracturas en elementos estructurales. Estas patologías generalmente inician por el efecto de la humedad en las partes inferiores de los

muros en contacto con el suelo lo que provoca un estado de humedad permanente en los elementos debido al efecto capilar del agua al contacto con materiales.

3.4.1 Fachada principal

En esta zona los daños se observan con mayor intensidad en el primer metro y medio del muro con los cambios de tono en el sillar de piedra, además de un mayor desgaste de la roca (figura 9). Los principales daños identificados son: *flaking*, *scaling*, *black crust*, *colouration* y daños antropogénicos. La zona próxima al acceso principal del templo presenta daños antropogénicos principalmente por desechos humanos, generando una capa impermeable negra y un olor desagradable.



Figura 9. Zona deteriorada sobre la fachada frontal de la catedral

3.4.2 Fachada lateral norte

El muro en la parte norte, el cual se encuentra sobre la calle, muestra pocos signos de deterioro, esto se debe a que la mayoría de los muros son parte de la nave lateral de construcción reciente (del año de 1911). Una parte del muro corresponde a la nave principal, construida en la primera etapa del siglo XVIII; sobre este muro existen daños como *flaking* y *scaling*. Los principales daños observados en las paredes de la nave lateral norte son: *black crust* debido a humedad, desprendimiento de matriz de la piedra,

daños antropogénicos y un patrón de agrietamiento que parte del piso hasta la cornisa del muro de la nave lateral (figura 10). Este último daño es considerado como el de mayor importancia debido a que afecta las condiciones estructurales del muro.

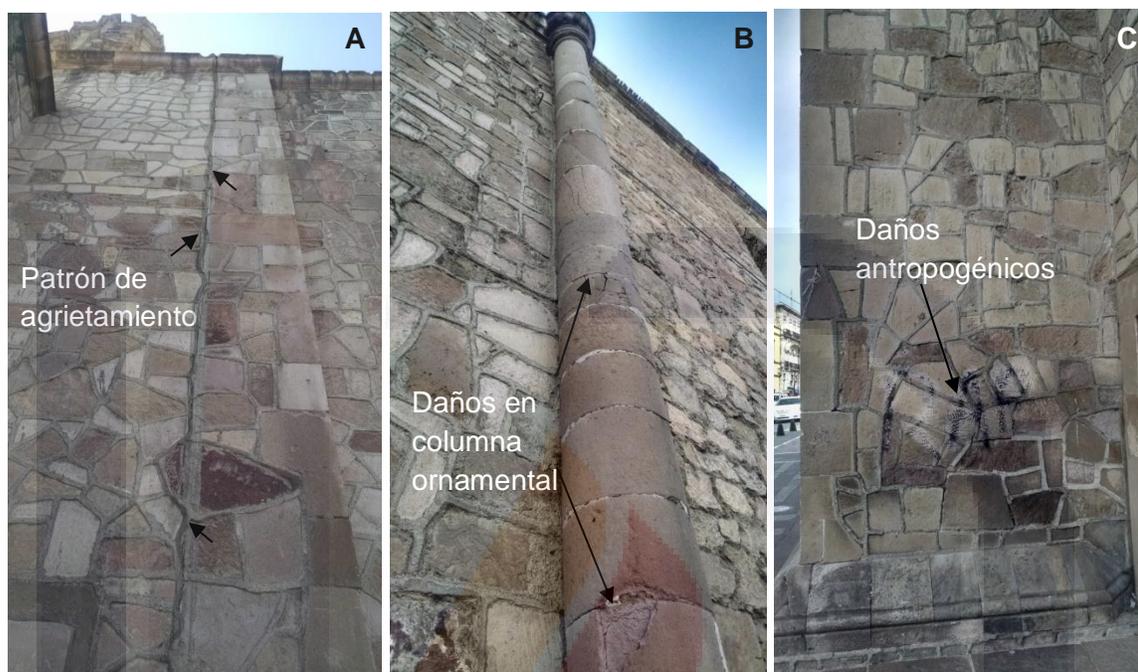


Figura 10. Daños en muro norte. A) Patrón de agrietamiento debido a la coincidencia de juntas sobre una misma línea. B) Columna circular ornamental con daños de agrietamiento y desprendimiento de la capa superficial de las piezas. C) Daños antropogénicos en muro (líneas de pintura en aerosol).

3.4.3 Fachada lateral sur

El muro sur, al igual que el muro norte, se construyeron en el año de 1911 como parte de las naves laterales realizadas por el sr. Refugio Reyes. En términos generales, los muros en esta zona presentan un bajo deterioro, los daños más comunes son: *splitting*, *flaking*, *scaling* y desprendimiento de elementos, así como *black crust*, *colouration* y un patrón de agrietamiento en la unión de muros con diferente sistema constructivo (figura 11). Existe una zona en la parte superior del muro con un deterioro importante el cual podría deberse a la combinación de diferentes materiales (piedra, tabique rojo, concreto y varillas) que en conjunto con la humedad derivó en una mayor degradación (figura 11A).



Figura 11. Zonas de mayor degradación en el lado sur de la catedral. A) Zona deteriorada en la parte superior del muro generada por el deficiente sistema de drenaje en la azotea de la nave lateral. B) Fractura de la columna circular ubicada a un costado del acceso al interior del templo. C) Daños por *flaking* y *scaling* en la parte inferior de los muros debido al efecto de la humedad por capilaridad.

3.5 Características y condiciones del subsuelo en el centro de la ciudad de Aguascalientes

El conocimiento de las características de los materiales y las propiedades del suelo donde se encuentra asentada la catedral de Aguascalientes contribuye en la toma de decisiones para tratar de contrarrestar o disminuir los efectos de los asentamientos o problemas derivados de los esfuerzos del suelo bajo condiciones de carga. En actualidad el inmueble continúa con problemas de inestabilidad del suelo. A partir del 2014 se han implementado una serie de trabajos para contrarrestar los problemas de asentamiento, uno de los trabajos consistió en la inyección de concreto en las oquedades y construcción de elementos de contención y estabilización del suelo, dichas irregularidades fueron detectadas por medio de métodos geofísicos. El problema presenta varias posibles explicaciones, una de ellas es la existencia de una serie de oquedades y presencia de humedad, ambos factores pueden estar provocando un reacomodo en el suelo y la derivación de asentamiento con efectos en el piso y la estructura del templo.

De acuerdo a datos históricos poco precisos sobre el suelo sobre el cual se encuentra cimentada la catedral de Aguascalientes, existen varias versiones sobre la existencia de una serie de túneles que conectan edificios religiosos antiguos. Según Varela (2005), en el libro “la vuelta a la ciudad de Aguascalientes en 80 textos, en el tema “el Aguascalientes subterráneo”, menciona que uno de los mitos con mayor presencia en nuestra ciudad por su fuerza y arraigo, es el de una intrincada red de túneles que pasa por debajo de la ciudad, conocida por muchos como “las cuevas de Juan Chávez”.

En el año de 1881, en el capítulo II, del libro “Historia del Estado de Aguascalientes”, Agustín R. González escribió el siguiente texto:

“En la capital del estado y bajo las calles de la merced y otras existe un gran edificio, ignorado hasta donde se prolongue, una arquería que solo ha causado admiración y espanto en el ánimo de las personas que lo han visto. La incuria de los gobiernos que han sucedido no permitió que fuese explorada esa obra, que haría importantes revelaciones...”.

Debido a la serie de versiones que la población ha generado, se han creado diversas hipótesis, una de ellas es: que los túneles son formaciones geológicas naturales, que posteriormente se usaron para diversos fines. La versión anterior se basa en la afirmación de que donde hoy está la ciudad de Aguascalientes, hace muchos años había un lago. De alguna manera esto también explicaría la existencia de manantiales de aguas termales que hicieron famoso al estado y le dan nombre (Varela, 2005).

Una de las hipótesis más completas y la única documentada, es la que se refiere a un acueducto que nacía en el manantial del cedazo para abastecer las huertas de la salud y el Encino, la fuente del obrador, Catedral, san Diego, la Merced y San marcos, y que en su trayecto nutría en forma considerable las norias de antiguas casas, actualmente conocidas como la biblioteca Jaime Torres Bodet y el actual Museo Regional de Historia (Varela, 2005).

En la visita realizada al archivo histórico del estado con el objetivo de obtener información concerniente a los túneles y que pudieran estar directamente relacionados con el problema de asentamiento que sufre la catedral, se encontraron registros en varios libros, en los que se hace mención del acueducto el Cedazo construido a finales del siglo XVIII (figura 12), con una longitud de cuatro kilómetros desde el Cedazo al centro de la ciudad (Varela, 2005; Madrid, 1995).

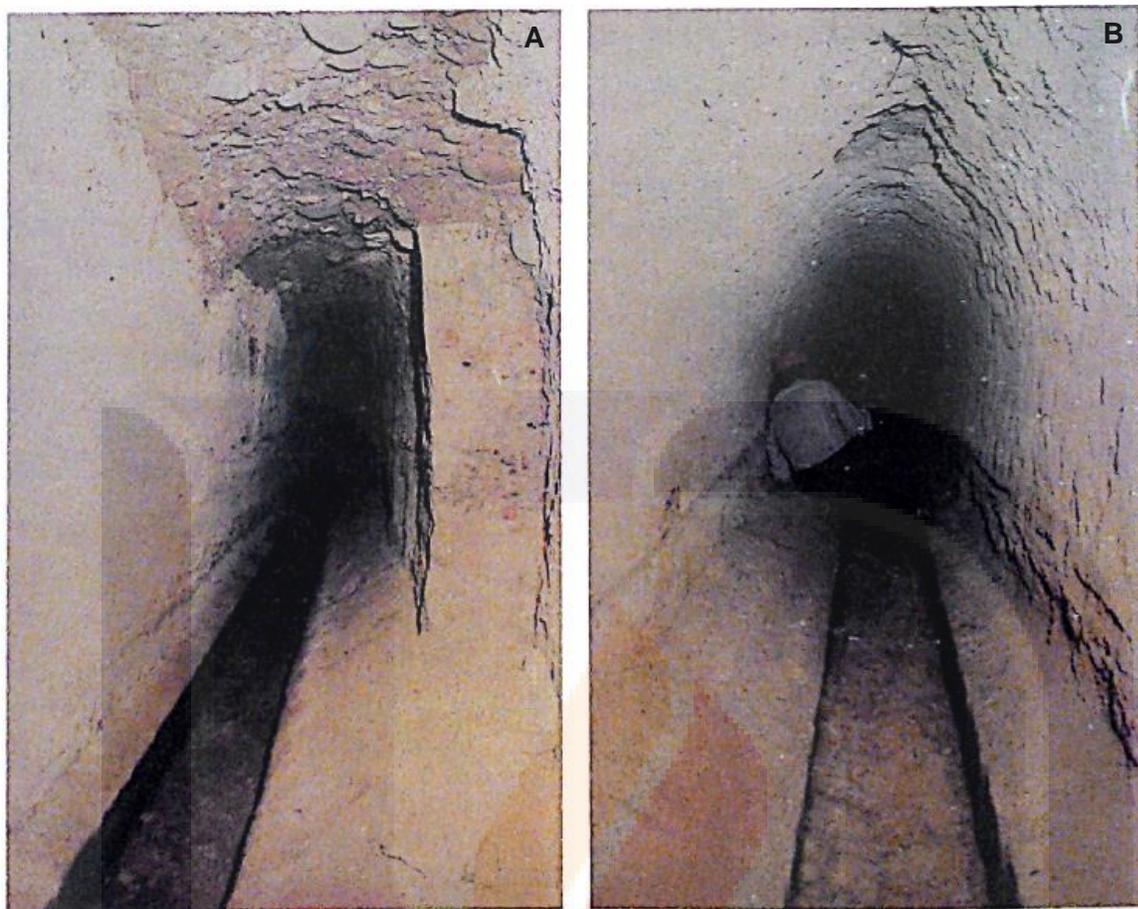


Figura 12. Imágenes del acueducto el Cedazo. A) Tramo de acueducto con bóveda sin recubrimiento, B) Tramo de acueducto con menor deterioro en bóveda y paredes (Varela, 2005).

Según la descripción realizada por el Dr. Díaz de león, el acueducto tenía dos ramales, uno que partía de la margen izquierda del arroyo de la Macías (los Arellano) y con rumbo al sur se unía con el ramal por abajo del arroyo del cedazo rumbo al poniente (ver figura 13) (Madrid, 1995).

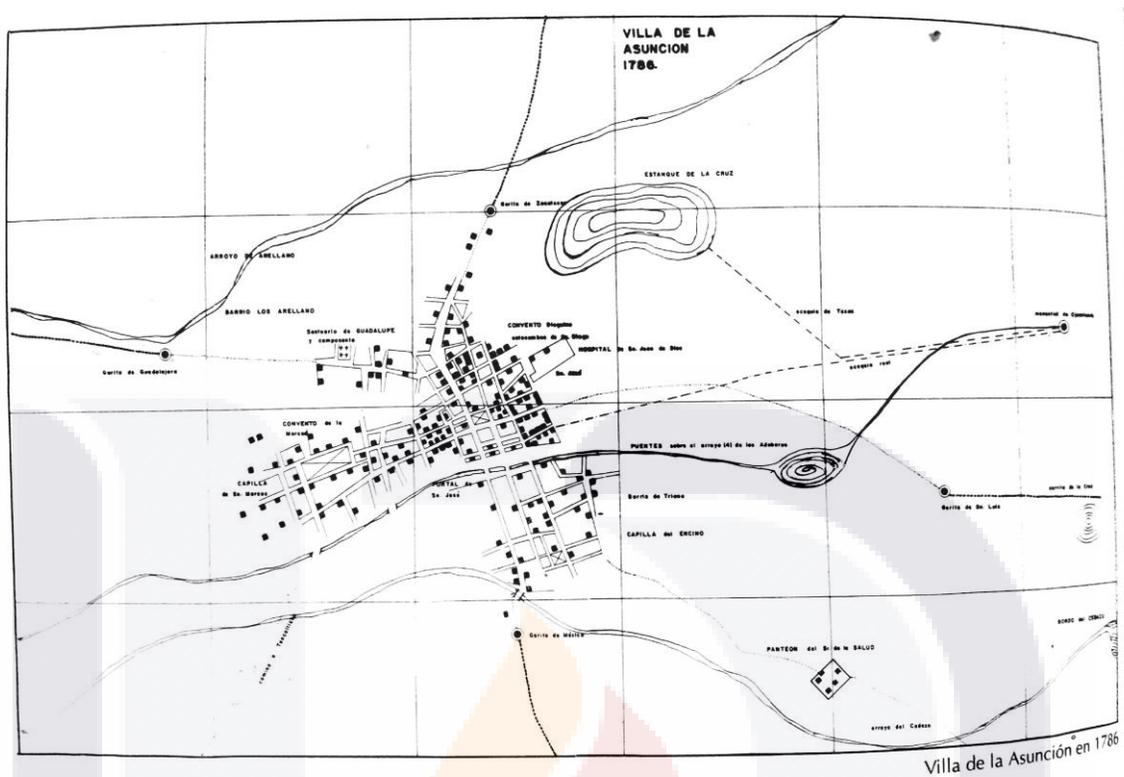


Figura 13. Mapa de Villa de la Asunción (Aguascalientes) en 1786 (Madrid, 1995).

Una serie de testimonios de personas que conocieron los túneles mediante sus relatos contribuyeron a ubicar parte de los túneles, principalmente el trayecto entre el jardín del arte de la casa de la cultura, encontrándose anteriormente la Escuela Federal Tipo Dr. Jesús Díaz de León, y la escuela José Reyes Martínez, que se encontraba a un costado del templo de San Marcos. También fue posible ubicar los que confluían a la parte inferior de las catacumbas del templo de San Diego; resultando durante las excavaciones del Mercado Terán, el Parían, y el estacionamiento del centro comercial Plaza Patria; los de la calle Primo Verdad y Hospitalidad, hasta llegar a la escuela Pía o de Cristo y el que está debajo de la fuente del jardín de San José y, por supuesto el ramal que inicia en la unidad habitacional INDECO Benito Juárez y el del Cedazo (Varela, 2005).

Según datos de un grupo de personas del Departamento de video producción de la Universidad Autónoma de Aguascalientes los cuales se introdujeron en los túneles, las dimensiones de uno de los túneles es de dos metros de alto por uno y medio de ancho, el otro túnel con un ancho cercano a los 3 m y altura de 2.5 m.

“El Ingeniero Francisco Javier Aguilar Valdez informó de la existencia de varias trayectorias de túneles, entre ellas están la línea que conecta a la casa de la cultura y la

línea que cruza la casa de la cultura con dirección al Jardín de San Marcos. Sin embargo, con respecto al problema de asentamiento que actualmente presenta la Catedral de Aguascalientes, el ingeniero plantea una hipótesis diferente a los túneles, y menciona que puede deberse a que la catedral está asentada sobre el cauce de un antiguo arroyo que descargaba al arroyo de los adoberos, hoy avenida Adolfo López Mateos.” (F. J. Aguilar, comunicación personal, 11 de Noviembre de 2014). Francisco realizó estudios de geofísica mediante el método de Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en ingles) en varias partes de la zona centro de la ciudad, debido a un problema de asentamiento detectado en varias construcciones antiguas.

Adicional a las hipótesis anteriores, la empresa Geofísica aplicada a la Geotécnica del Ingeniero Juan Antonio Fuentes López elaboró un Informe con título: Estudio Geofísico, Evaluación y análisis de las condiciones geofísicas y geológicas, Catedral Metropolitana de la ciudad de Aguascalientes, presentado a la Secretaría de Obras Públicas del municipio dirigido a la Arquitecta Leonor Elena Meléndez a cargo de los trabajos de restauración de la Catedral. El trabajo consistió en el empleo del GPR y el método de Tomografía Eléctrica con arreglo dipolo-dipolo. En la figura 14 se muestra cuatro líneas eléctricas de oriente a poniente y 9 líneas con el GPR. La separación de los electrodos fue de 3 m y se logró analizar una profundidad máxima de 7 m.



Figura 14. Ubicación y trazo de las líneas en mapa de Google Earth (Fuentes, 2014).

Mediante los perfiles obtenidos (Fuentes. 2014), reporta una capa de irregularidades a partir de los 4 m de profundidad lo que podría significar la existencia de posibles túneles o ductos. Además menciona la existencia de anomalías a una profundidad de 0 a 2 m, ubicada sobre las estaciones 12 y 15, en la zona con mayores problemas de asentamiento. Una segunda anomalía es ubicada sobre las estaciones 23 y 27, las cuales son relacionadas con criptas (figura 15).

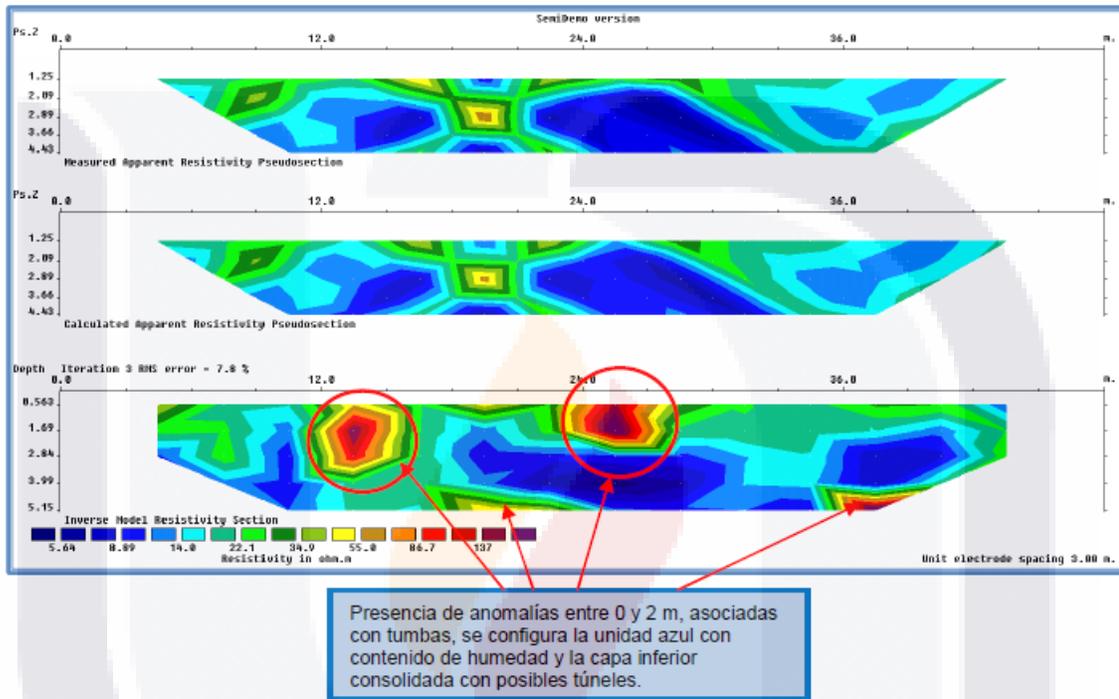


Figura 15. Modelo 1, medición de tomografía eléctrica (sur), línea de 42m (Fuentes, 2014).





CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CATEDRAL DE AGUASCALIENTES

4.1 Determinación de dimensiones geométricas de los elementos constructivos.

4.1.1 Información previa

La caracterización física y geométrica, además de la documentación histórica de las etapas constructivas de los edificios patrimoniales, son importantes para la evaluación integral y posterior intervención con la finalidad de lograr incrementar su vida útil. El trabajo en esta fase se desarrolla “in situ” mediante la observación y obtención de fotografías para la determinación de dimensiones (ancho, largo y alto) de la piedra y de cada uno de los elementos constructivos como son: muros de mampostería, contrafuertes, accesos, ventanas, torres, cúpulas, etc. También se hace un análisis de la geometría interna de los muros de mampostería (sección: número de hojas, acomodo y conexiones) basados en el programa AutoCAD con la creación de modelos en 3D.

Uno de los sistemas constructivos más usados para la edificación de los edificios patrimoniales en el estado de Aguascalientes, fueron los muros de mampostería a base de piedra junteada con mortero, por lo que su caracterización implica la determinación de la geometría de los muros (elevación y sección transversal) y la de los elementos constitutivos (fragmentos de roca y mortero), así como la determinación de la integración y acomodo de los elementos constitutivos que forman los muros.

El levantamiento detallado de los edificios patrimoniales considerando cada uno de los elementos estructurales que lo integran requiere de mucho tiempo y esfuerzo. Además, el levantamiento se complica debido a la heterogeneidad de los materiales con que fueron construidos los edificios de este tipo.

Se puede llegar a tener un mayor entendimiento del comportamiento estructural de la mampostería de edificios patrimoniales si se conocen las siguientes características: la geometría del muro o elemento de la mampostería, la textura de la mampostería, lo cual es una característica de rugosidad que resulta del trabajo de labrado realizado en la cara expuesta de la roca; la cantidad de hojas y el tipo de conexión entre ellas, la existencia de articulaciones vacías o llenas de mortero, si se usó ripio o guijarros, características químicas y mecánicas de los fragmentos de roca y del mortero que integran a la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

mampostería y las características mecánicas de la mampostería como un material compuesto (Kržan, 2014; Binda et al., 2000; Borri, 2004).

La complejidad de los edificios de mampostería antiguos, en su mayoría sometidos a muchas transformaciones durante su tiempo de vida, requeriría una investigación detallada de casi todos los elementos estructurales, ya que los datos adquiridos en un solo punto no son representativos de otras partes del edificio (Kržan, 2014).

La catedral de Aguascalientes presenta las siguientes dimensiones:

La nave central tiene un ancho de 27.30 m, 58.4 m de largo y una altura de 14.50 m; las naves laterales sur y norte tienen en promedio 30 m de largo, ancho de 6.8 m y altura de 9.40 m; sobre la parte frontal se elevan las torres a partir de los 14.5 m hasta los 38.5 m con un ancho de base de 8 m y 7.75 m por lado, la cúpula principal ubicada en la parte central del templo compuesta por 6 lados y con un altura de 7.76 m. A los costados de la fachada se erigen la capilla de Lourdes y la zona de criptas con 4.6 y 7.4 m por lado y una altura de 7.4 m. En la parte interior existen 12 columnas de formas irregulares conectadas mediante un sistema de arcos que sostienen el embovedado de la nave central. Los espesores de los muros son muy variables, dependen de la altura y del sistema constructivo empleado; los muros de la nave central van desde 1.5 m a 2.2 m y los muros de las naves laterales tienen 80 cm de espesor promedio. En la parte frontal se encuentra el atrio compuesto de muros de mampostería a media altura y barandal de herrería empotrado a columnas. En la figura 16 se muestra la fachada de la catedral.

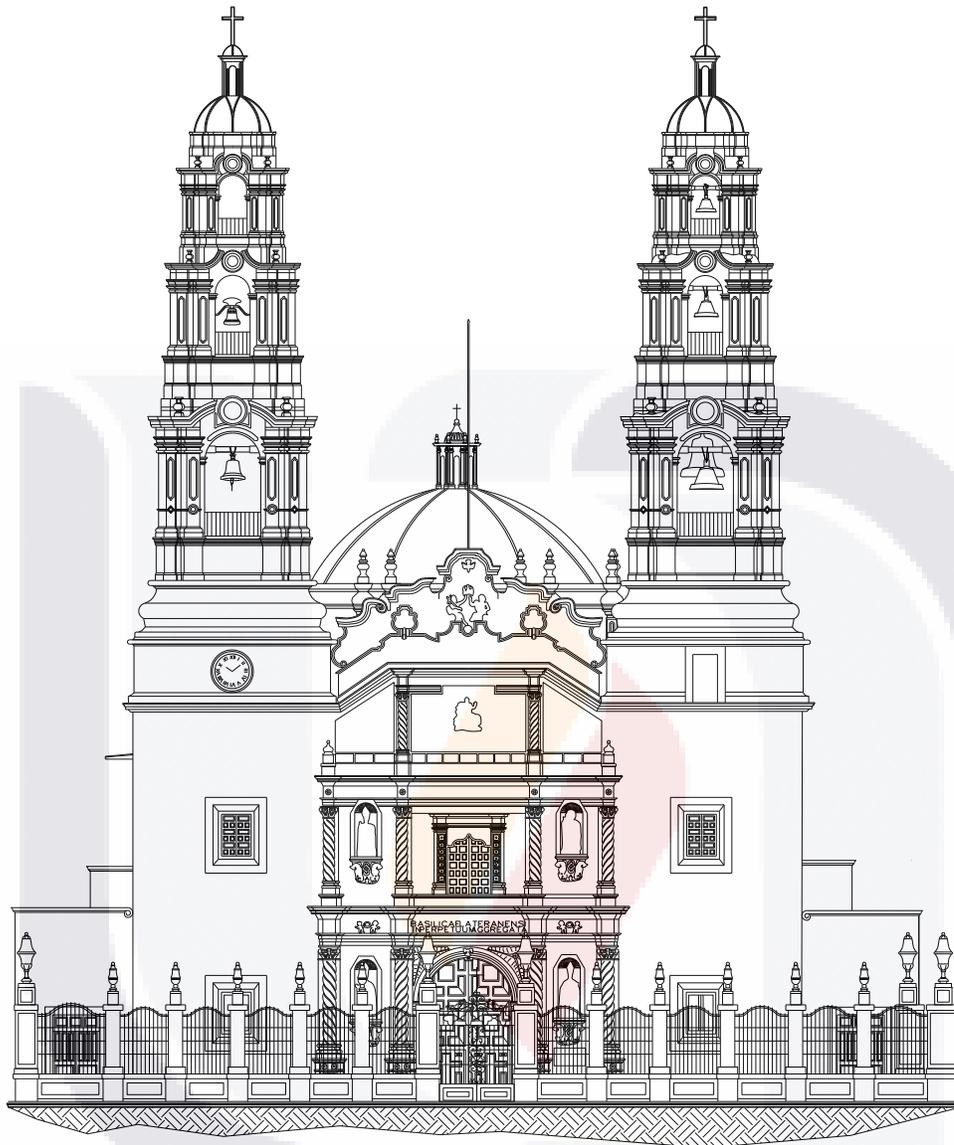


Figura 16. Fachada principal con atrio de la Catedral Basílica

4.1.2 Empleo de la fotogrametría para la obtención de modelos geométricos en 3D de la Catedral

4.1.2.1 Introducción

Existe una amplia variedad de formas para la documentación del patrimonio tangible dentro de las cuales destaca la documentación geométrica. Este tipo de documentación es importante debido a que aporta en el conocimiento, conservación, restauración o de la simple divulgación de los restos monumentales. La virtualización del patrimonio edificado

por medio de la técnica fotogramétrica y modelado en 3D, actualmente es una de las principales alternativas en el estudio del patrimonio edificado. Así mismo, aporta una visión amplia del inmueble y muestra detalles importantes en zonas de difícil acceso. La fotogrametría aplicada en el patrimonio edificado ha tenido importantes avances en la planificación, reconocimiento, así como acciones de rehabilitación y conservación.

La historia de la fotogrametría tiene sus primeros registros en la década de 1850 con el inspector francés Aimé Laussedat, al darse cuenta que con las características ópticas de una cámara, varias imágenes tomadas con la cámara desde ángulos ligeramente diferentes podrían ser comparadas para obtener mediciones precisas (Laussedat, 1854; Laussedat, 1859). A través de la historia, uno de los principales enfoques de la fotogrametría con el análisis de fotografía aérea estéreo o también reconocida como cartografía aérea precisa de rasgos arqueológicos ha sido en la arqueología como por ejemplo las marcas de las cosechas (McCarthy, 2014).

Un ejemplo reciente del uso de la fotogrametría es el proyecto Northumberland y Durham Art Rock (NADRAP), un proyecto de gran éxito financiado por el patrimonio inglés (Bryan y Chandler, 2008). Mediante la fotogrametría se obtuvieron modelos densos y precisos en 3D de las características de aproximadamente 1500 sitios de arte rupestre.

El estudio geométrico del patrimonio cultural, ya sean sitios arqueológicos o construcciones históricas, se refiere tanto al reconocimiento de las formas, a la medida de los elementos y a la disposición espacial desde una perspectiva global o local. La documentación geométrica puede ser en 2D o 3D, y se realiza mediante fotos, mapas a escala, planos de planta, perspectivas, elevaciones o secciones, modelos en 3D o reconstrucciones virtuales. El proceso desarrollado consta de tres partes: obtención, procesamiento y resultados. Cada una de las etapas antes mencionadas han experimentado un importante cambio en años recientes debido al avance en las computadoras y las tecnologías disponibles, las cuales han evolucionado para ser capaces de obtener, procesar y proporcionar visualizaciones de la información geométrica de los edificios dando origen al desarrollo de nuevas técnicas y procedimientos aplicados en diferentes ramas de la ingeniería.

En lo que refiere a la fase de captura de datos mediante las técnicas tradicionales entre las cuales se encuentran: la topografía, el GPS y la fotogrametría tradicional terrestre y

aérea, se agregan técnicas modernas como: el escáner laser terrestre o aéreo y el vehículo aéreo no tripulado. Este último en conjunto con una cámara fotográfica y mediante el empleo de técnicas fotogramétricas arroja resultados que alientan a continuar perfeccionando esta técnica. La virtualización de patrimonio edificado es esencial para medir y revisar el comportamiento y los cambios presentados a través del tiempo mediante una comparación de modelos, así como evaluar el grado de conservación de los materiales empleados. El conocimiento a detalle del edificio es parte importante para la implementación de medidas de seguridad del edificio y disminuir riesgos. Lo que es esencial para este tipo de edificios los cuales se encuentran en constante servicio y son lugar de concentración de una importante cantidad de personas. En el transcurso del tiempo, el deterioro progresivo de los materiales, el agotamiento de algunas estructuras y los daños causados por las sucesivas reformas terminan llevando a la destrucción y la pérdida de los edificios.

En este trabajo se lleva a cabo la fotogrametría de largo alcance para obtener el modelo 3D de la catedral de Aguascalientes y probar la viabilidad del uso del método en la obtención de las características geométricas y físicas del edificio. Para la fotogrametría de largo alcance, el trabajo se apoyó en vehículos aéreos no tripulados conocidos como drones, los cuales se utilizaron para la adquisición de fotografías de zonas de difícil obtención como son azoteas, cornisas, zonas altas de los muros, cúpulas y torres; la fotogrametría aérea se complementó con fotografías obtenidas de forma manual. En la figura 17 se muestra el equipo aéreo y la cámara empleada.

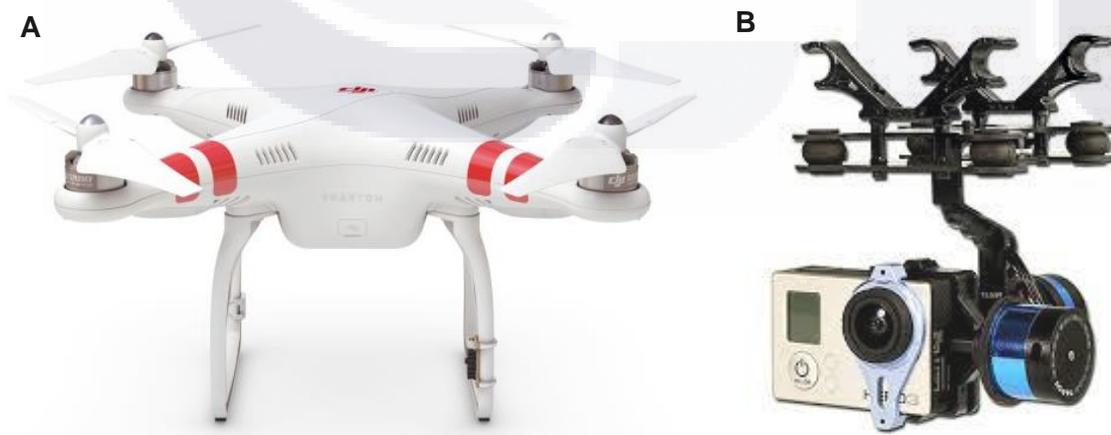


Figura 17. A) Equipo aéreo UAV-Phantom II vision quadcopter. B) Cámara Gopro Hero3+black edition y soporte (Gimbal).

En la obtención de foto datos, primeramente se realizó un plan de trabajo para obtener fotografías con secuencias definidas. Posteriormente se realizaron los vuelos en cada uno de los costados del edificio en diferentes días aproximadamente a la misma hora del día. Los vuelos se realizaron a alturas de 40 m y con una distancia de separación del edificio de 15 m aprox. Se obtuvieron un total de 854 fotografías con la cámara semiprofesional y 5 videos de 765 segundos tomados por el dron. De los videos posteriormente se extrajeron 224 fotografías mediante el procesamiento descrito a continuación. Después de hacer el procesamiento y obtener los primeros modelos, se optó por tomar más fotografías para rellenar los espacios o mejorar las zonas con poca definición.

4.1.2.2 Procesamiento

Primeramente se procesaron los videos para obtener imágenes en el software GoPro Studio. En la figura 18 se observa la pantalla del programa durante el procesamiento de video en la etapa de extracción de imágenes.

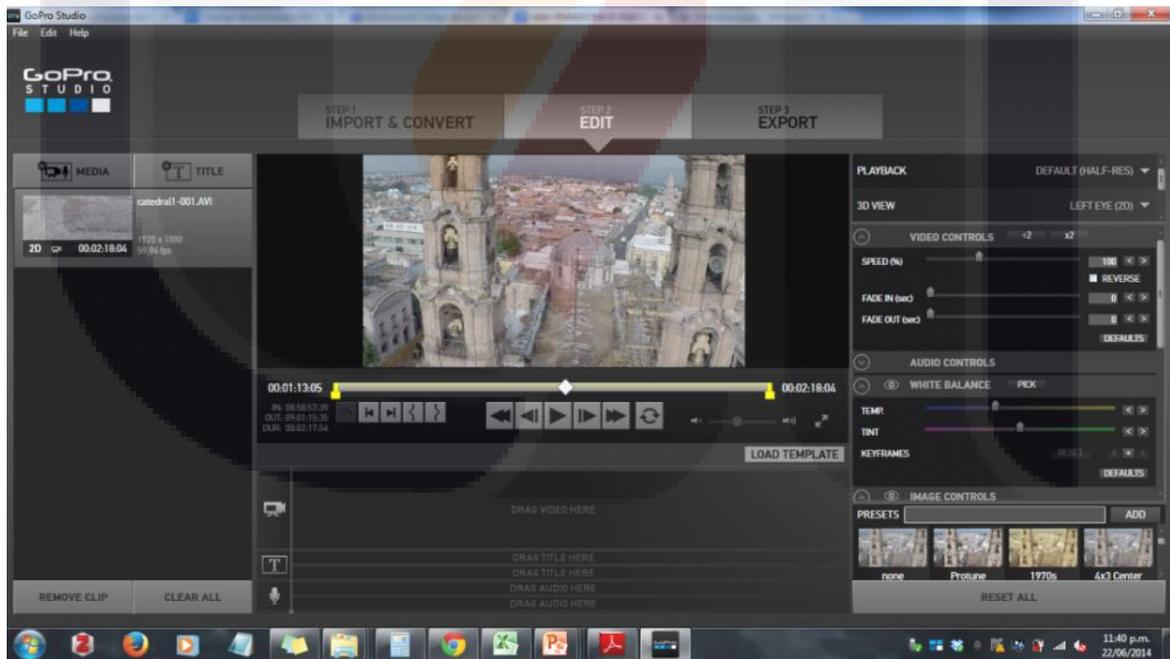


Figura 18. Imagen de pantalla capturada durante el procesamiento en Software Gopro studio.

Las fotografías se procesaron en el software Agisoft Photoscan. Este software permite obtener modelos en 3D a partir de secuencias fotográficas de objetos, construcciones o superficies. Para construir el modelo se crearon grupos de fotografías por cada lado y

posteriormente se fusionaron para obtener el modelo completo. En una primera etapa del proceso el modelo crea una nube de puntos dispersa al realizar la orientación de fotografías como la que se observa en la siguiente imagen (figura 19).

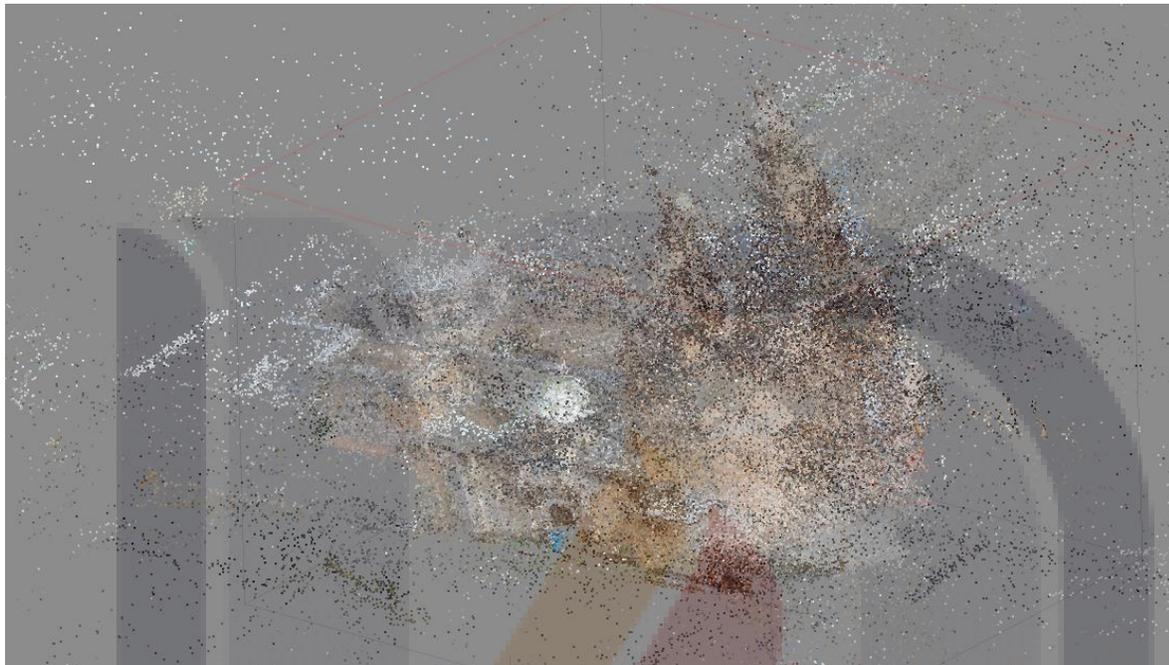


Figura 19. Primera etapa de nube de puntos dispersa en el procesamiento de imágenes en el software Agisoft Photoscan.

Después de orientar las fotos, se continúa con la nube de puntos densa, la construcción de la malla y creación de textura para finalmente obtener el modelo completo como el que se observa en la figura 20.

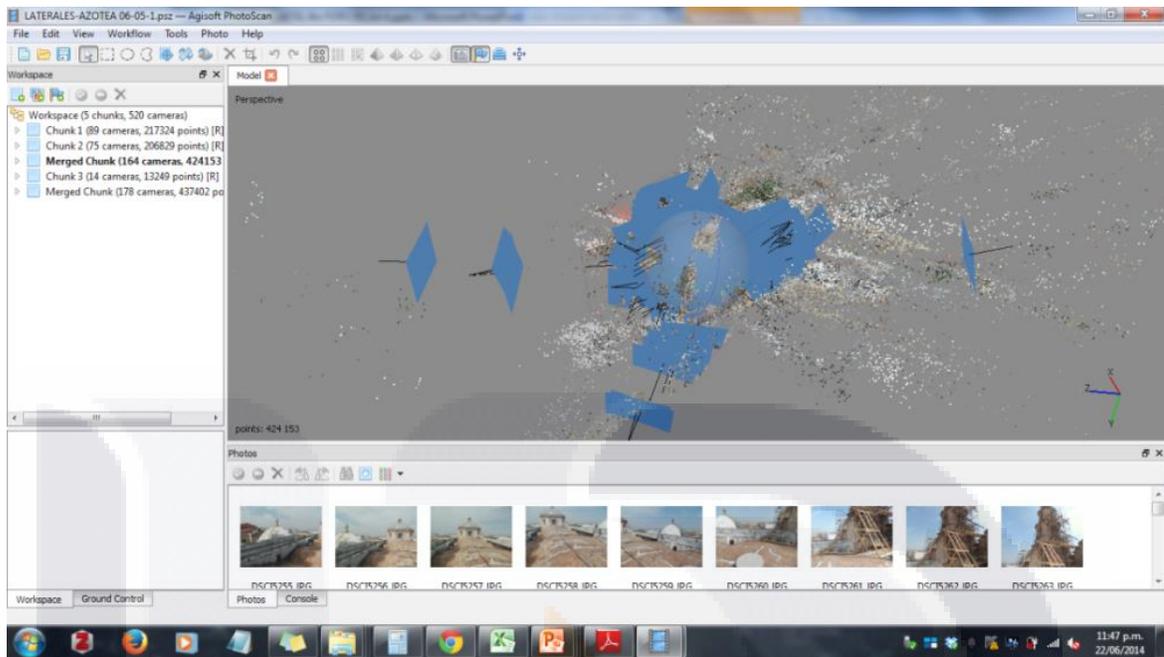


Figura 20. Impresión de pantalla de obtención de modelo final después de realizar el proceso de creación de texturas en el software.

4.1.2.3 Resultados

Después de llevar a cabo un gran número de intentos para la obtención del modelo completo de la Catedral con el procesamiento de hasta 1500 imágenes, fue posible obtener algunos modelos. A continuación se muestra el modelo vectorizado (figura 21) y el modelo vista de planta de la azotea de la catedral (figura 22).

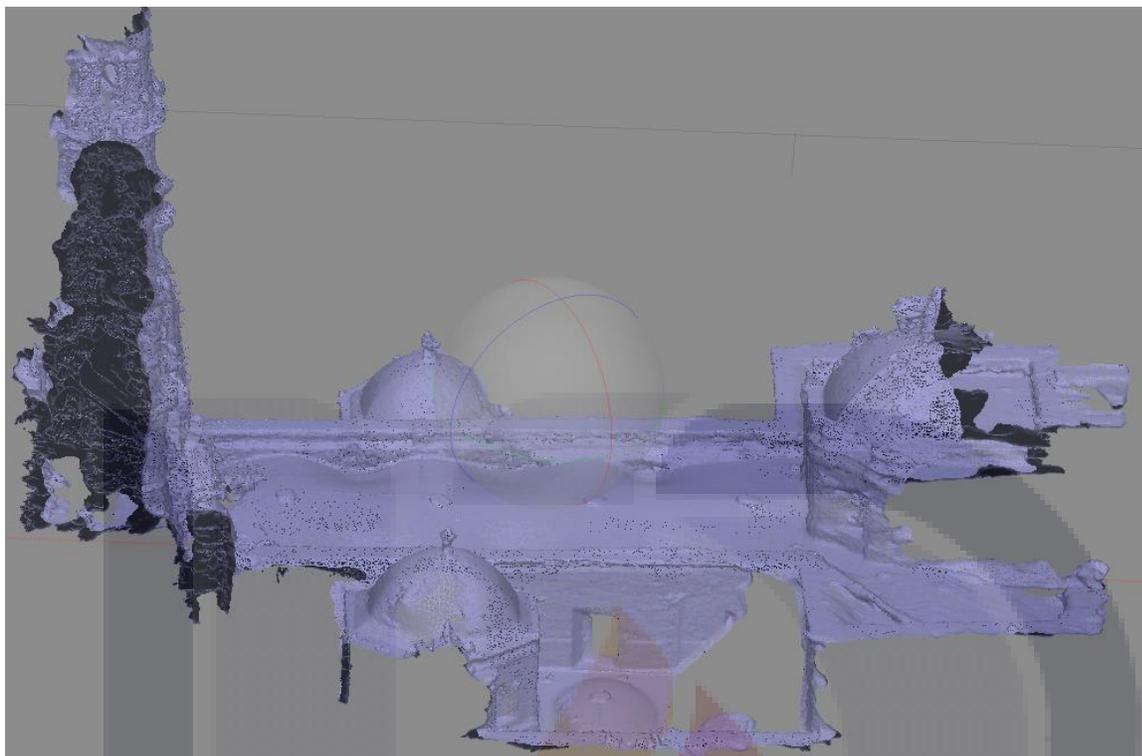


Figura 21. Modelo vectorizado de la azotea de la catedral.

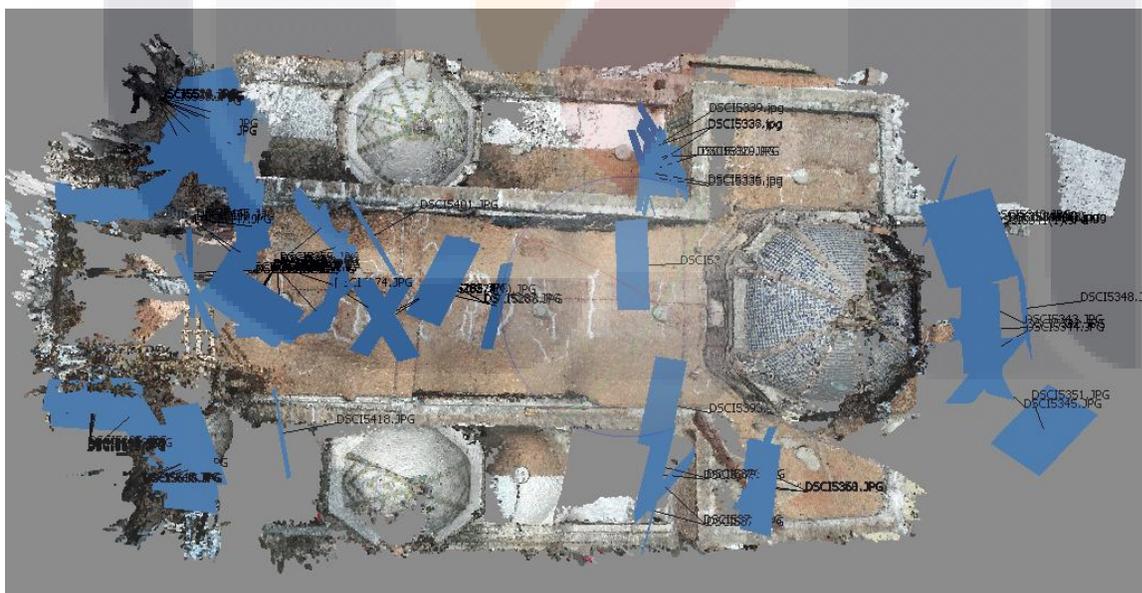


Figura 22. Modelo vista de planta de la azotea de la catedral. Las figuras en azul representan las ubicaciones de la cámara.

El modelo 3D de mayor calidad que se pudo lograr se muestra en la figura 23. Este modelo presenta baja calidad en la resolución y varias zonas incompletas, sin embargo

fue posible obtener aproximadamente un 80% del edificio, lo que significa un avance importante en la aplicación de la fotogrametría a gran escala.

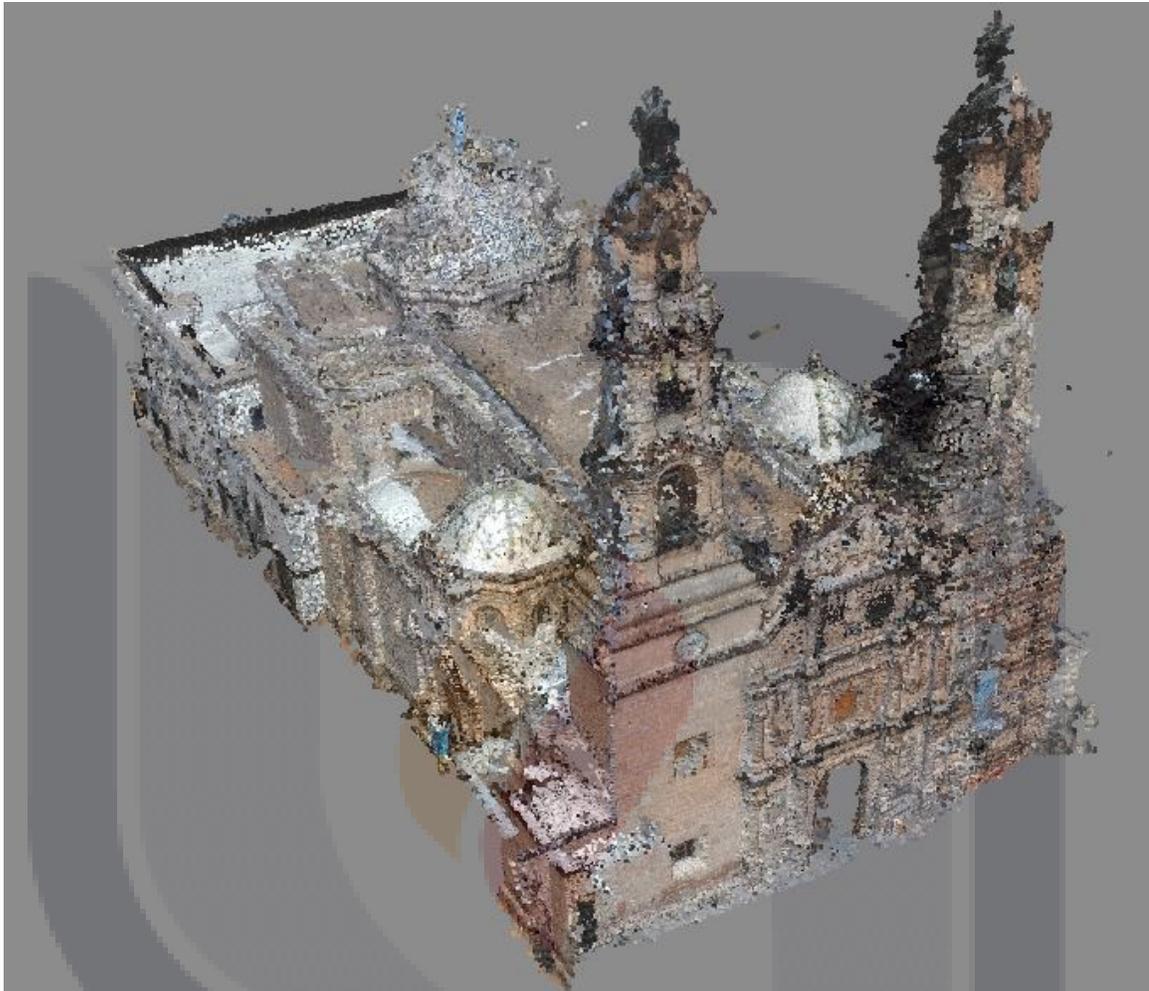


Figura 23. Modelo completo de la catedral creado en el programa Agisoft Photoscan.

Los resultados son alentadores ya que se lograron obtener detalles geométricos relevantes y datos de las condiciones actuales del edificio. Una de las ventajas es que se puede obtener el modelo 3D vectorizado el cual puede ser manipulado en programas de análisis numérico para simulaciones de esfuerzos y deformaciones.

Adicional a los modelos a gran escala mostrados, se obtuvieron modelos de fotogrametría de corto alcance de las zonas con mayor deterioro sobre la fachada principal al costado de derecho del acceso y en el muro del lado sur, con la finalidad de medir, comparar y monitorear los niveles de desgaste, el aumento o disminución de las áreas afectadas y la

intensidad de los daños a través del tiempo. Las figuras 24 y 25 muestran algunas zonas deterioradas de los muros.

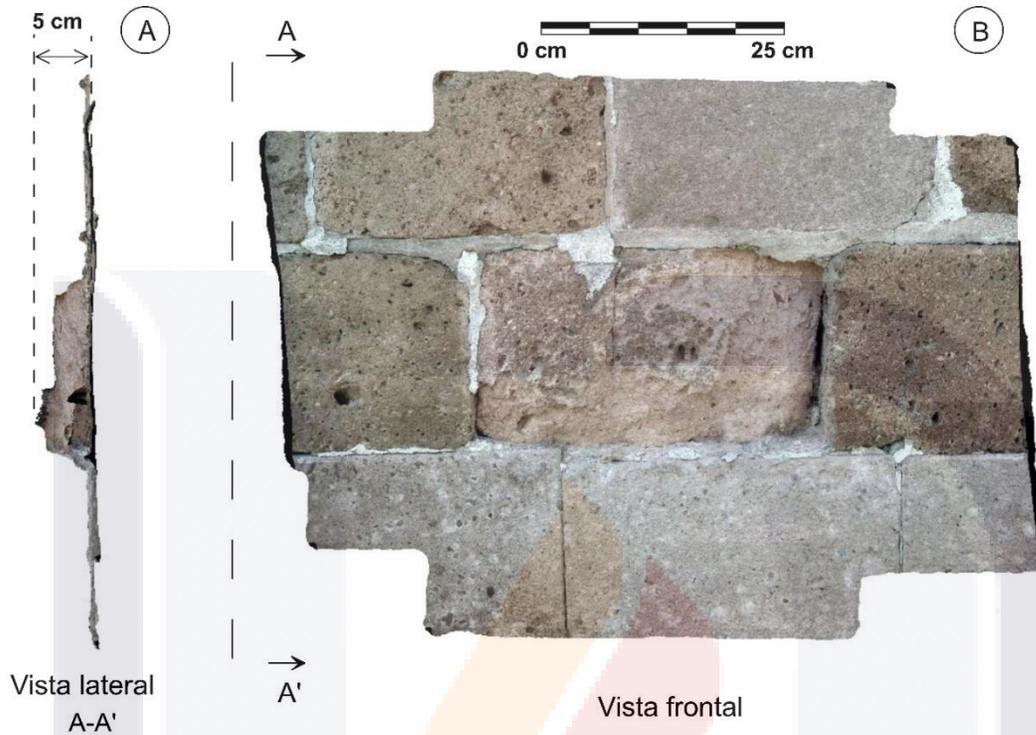


Figura 24. Modelo de fotogrametría de corto alcance de zona deteriorada en muro de fachada principal. A) Modelo vista lateral A-A', con profundidad máxima de desgaste de 5 cm. B) Modelo vista frontal.

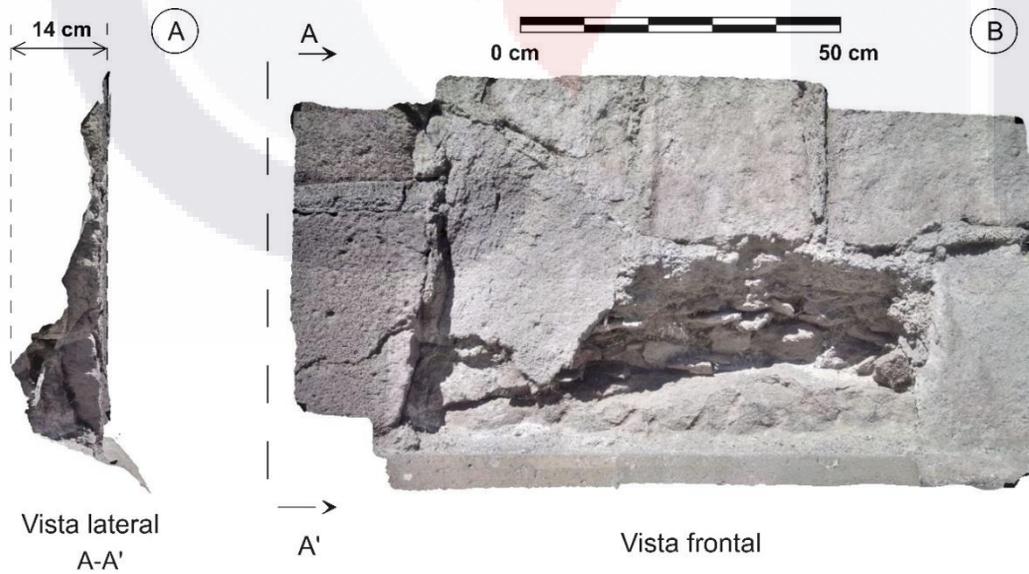


Figura 25. Modelo de fotogrametría de corto alcance de zona deteriorada en muro de fachada lateral sur. A) Modelo vista lateral A-A', con profundidad máxima de desgaste de 14 cm. B) Modelo vista frontal.

4.1.2.3 Conclusiones

En la etapa de documentación geométrica mediante la técnica fotogramétrica se concluye que:

Aun cuando no se obtuvo un modelo completo de la catedral, se logró obtener un modelo parcial de la geometría externa del edificio, con texturas y colores, en el que se observan las técnicas constructivas empleadas en cada elemento, así como las condiciones de deterioro del edificio. Además, el método es muy flexible ya que si la información no es lo suficientemente detallada, se puede recurrir a archivos digitales fotogramétricos adquiridos en campo en intentos posteriores, con el fin de completar o mejorar el modelo. Todo esto facilita el trabajo de campo, mejora los tiempos de procesamiento, así como también permite lograr una mayor calidad. La implementación del método antes de una intervención al edificio, podría ser importante en la toma de decisiones de las actividades a realizar.

Así mismo, se puede recurrir a la fotogrametría de corto alcance para la definición a detalle las zonas de mayor afectación o zonas de interés para el monitoreo a través de los años y observar la evolución del deterioro o patrones de agrietamiento que puedan afectar la condición estructural del edificio.

La obtención de modelos en 3D de edificios históricos es un proceso complejo debido al alto nivel de heterogeneidad y a la complejidad de la geometría. En el trabajo realizado en la catedral, el bajo nivel de la calidad y la precisión del modelo en 3D se debe a los siguientes aspectos: la alta variación de la calidad de las fotografías obtenidas con el equipo aéreo no tripulado y las obtenidas en forma manual, el entorno próximo al edificio como las construcciones aledañas y vialidades limitan los trabajos de obtención de fotografías desde diferentes ángulos, las sombras proyectadas en algunas fachadas o áreas afectan en la definición de las zonas, problemas de conexión de las caras del edificio, así como la deficiente definición de las zonas altamente detalladas, por ejemplo las torres y la parte central de la fachada. Ha habido una serie de estudios que han demostrado que múltiples imágenes de fotogrametría pueden lograr resultados similares o incluso superiores a los de los escáneres láser en las condiciones adecuadas (Chandler y Freidora, 2013; Georgantas et al., 2012; Pierrot-Deseilligny et al., 2011).

Las principales ventajas de la fotogrametría utilizada en el patrimonio edificado con respecto a los demás métodos, es la rapidez de la obtención de las imágenes y el bajo costo del método.

4.2 Características de los sistemas constructivos empleados en muros de mampostería.

4.2.1 Introducción

El conocimiento de los sistemas constructivos, el tipo de material empleado, las etapas de construcción y la geometría del edificio permiten definir estrategias de intervención usando materiales con características similares a los originales y técnicas constructivas antiguas usadas en la edificación del edificio. Sin embargo, muchas de las prácticas de trabajo, así como el proceso de extracción y elaboración de los materiales ya están en desuso, debido a que en la actualidad varios de los materiales se han dejado de producir o ya no existe la mano de obra que domine las técnicas y procesos de construcción empleadas originalmente. Además, se desconoce la ubicación de los bancos de donde fueron extraídos los materiales.

Aun cuando se conozcan las características de los materiales usados y las técnicas constructivas empleadas, la determinación del comportamiento mecánico de la edificación es una tarea compleja debido a los cambios en la roca que han causado tanto el efecto de la intemperización y las condiciones de esfuerzo a las que se ha sometido.

En la práctica, es común que no se tengan registros de las intervenciones que un edificio patrimonial ha experimentado a lo largo de su historia. Estos registros permitirían determinar cuál es la estructura original y cuáles las posteriores modificaciones o adiciones a la misma. Una de las formas de identificar las intervenciones y etapas constructivas de un edificio patrimonial es mediante observaciones "in situ". Las observaciones se enfocan en la identificación de diversos indicios como: grados de deterioro (cambios de tono en materiales de características similares o mayor desgaste), discontinuidad de elementos constructivos, cambio de los materiales, el empleo de diferentes técnicas constructivas, una mala integración de los elementos estructurales e inclusive problemas de estabilidad, desintegración o derrumbes. Todos estos indicios pueden significar diferentes periodos de construcción.

Una de las características más importantes debido al grado de influencia en el comportamiento mecánico de los elementos de mampostería es el tipo de sección mostrada (número de hojas y la conectividad entre ellas), este aspecto aumenta la complejidad para evaluar numéricamente el comportamiento mecánico de los elementos, ya que la caracterización de la disposición y acomodo de los fragmentos de roca es una tarea aún sin resolver en la práctica. Algunas de las tipologías de los muros de mampostería son las que se enlistan a continuación (Binda, 2003):

- Muro sólido de una hoja, compuesta por una piedra por espesor o piedras bien conectadas (por lo general por las cabeceras o extremos) y organizado en cursos horizontales o sub-horizontales (véase la Fig. 26a.);
- Muro de dos hojas, formado por dos hojas separadas conectadas por un relleno realizado con pequeños materiales de escombros unidos con mortero (fig. 2b), o a través de la superposición periódica de las piedras (Fig. 26c);
- Muro de múltiples hojas, generalmente constituido por capas externas con una textura regular y una o más hojas internas compuestas por un relleno irregular (fig. 26d);
- Muro de piedra en seco, generalmente compuesta por bloques de forma irregular unidos por pequeña piedra o detritus de ladrillo y en algunos casos por las cuñas de piedra (Fig. 26e).

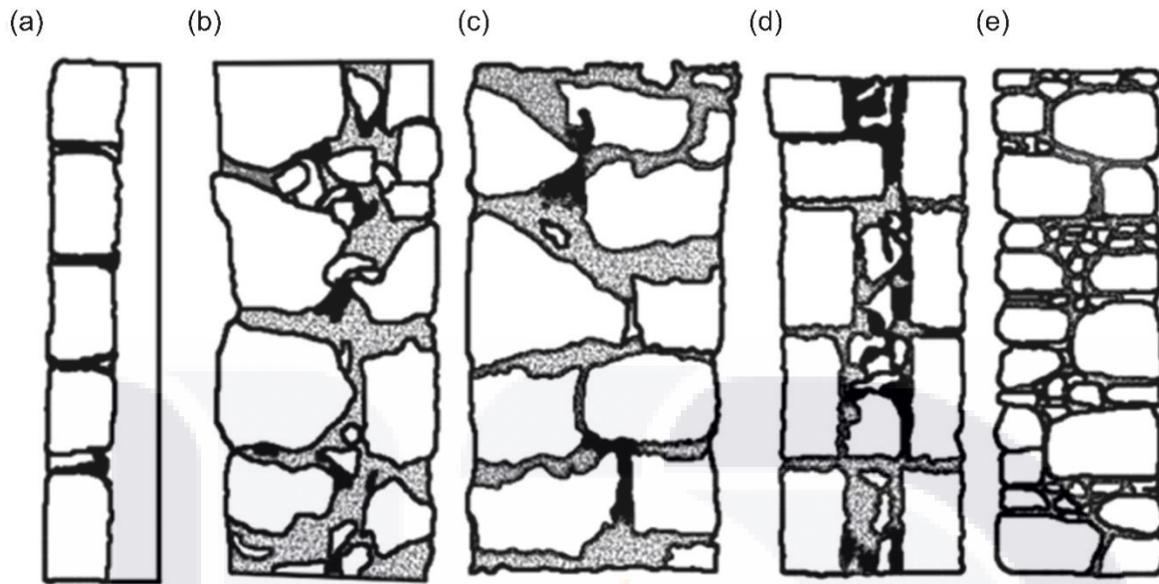


Figura 26. Ejemplo de los diferentes tipos de mampostería, clasificación basada en las características de la sección (Quelhas, 2014). a) Muro de una hoja, b) muro de doble hoja sin conexiones, c) muro de doble hoja con conexiones, d) muro multihojas (3 capas), e) muro seco sin juntas de mortero.

En mampostería de piedra de varias hojas, es común encontrar una mezcla de diferentes materiales, desde tierra, ladrillos rotos, piedras, fibras, etc.; conocido como material de relleno, colocado sin compactación y en algunos de los casos sin existir una conexión con las hojas exteriores (Quelas, 2014).

4.2.2 Metodología y materiales

En la obtención de datos de las condiciones actuales de la construcción se llevó a cabo un levantamiento fotográfico del interior y exterior, de los elementos estructurales, principalmente de los muros. Se realizaron una serie de mediciones de los elementos para obtener el ancho de muros en la zona de las puertas y ventanas, ancho de contrafuertes y columnas, ancho del inmueble y altura de muros bajos.

Para el procesamiento de imágenes se seleccionaron fotografías representativas de los muros. Aun cuando una de las principales características es la alta heterogeneidad, fue posible detectar aspectos y patrones en común tales como trabajo de labrado de la roca, similitudes en los materiales, acomodo de los elementos, variación en el espesor y en el material de las juntas, entre otros aspectos. El procesamiento consistió en reproducir

esquemáticamente las fotografías de la mampostería en el software AutoCAD, se dibujó el área de cada una de las rocas de la imagen, se sumó el total de las áreas con roca y al área total se le restó al área de las rocas. Finalmente se obtuvieron porcentajes de roca, ripio y mortero. En una tabla de Excel se vaciaron los datos de los sitios de interés, además de fotografías y figuras esquemáticas generadas, para posteriormente elaborar una descripción detallada de las características del muro y los porcentajes de elementos.

El equipo empleado para el levantamiento de campo consistió en una cámara fotográfica semiprofesional Canon de 16 mpx powershot modelo SX 400 IS, y un estadal telescópico de aluminio marca Sokkia con graduación de lectura E" al frente y 5 mm en la parte posterior, utilizado en la obtención de dimensiones de espesores y alturas, además de usarlo como escala de referencia en las fotografías tomadas.

4.2.3 Sistemas constructivos en muros de mampostería de piedra

En la construcción de los muros se emplearon varios sistemas constructivos. En la nave principal, construida en el siglo XVIII, en lo que corresponde a los muros se emplearon técnicas de construcción con las siguientes características: un aparejo irregular de mampostería careada en roca con poco trabajo de labrado con formas redondeadas y alargadas, un acomodo variable en sentido horizontal, vertical y en diagonal; textura altamente rugosa, presenta una variación importante en las juntas, con una mezcla de mortero y alto porcentaje de ripio; la roca es de tamaño mediano-grande (40 cm promedio). El ancho de los muros es variable, de 1 a 2 m, la altura del muro es de 14.5 m, de acuerdo al tamaño de los elementos y las dimensiones del muro la sección está integrada por multihojas con dos hojas externas y una o más hojas internas conectadas. Con base en las características mencionadas, existe un alto grado de heterogeneidad.

En las naves laterales, se muestra un sistema constructivo distinto. Los muros presentan un aparejo semirregular, con piezas en forma prismática labradas en la mayoría de las caras, la cara expuesta es de textura lisa, las juntas son de mortero de espesor promedio de 2 cm con acabado en borde sobresalido a 45° con una función estética. Es probable que el muro tenga una estructura en su sección de dos hojas en los extremos con relleno central ligado a las hojas exteriores. El grado de heterogeneidad es menor, sin embargo existe una alta variación en el acomodo y en la forma de las rocas. Predominan cuatro clases de roca toba en tonos de rosa (S01 y S02), morado (S04) y blanco (S05). El

espesor de los muros tiene un promedio de 1 m y una altura de 10 m, los elementos son de tamaño mediano (40 cm promedio), en los extremos de los muros tiene esquineras conformadas con sillares de cantera, estos elementos aportan mayor estabilidad al muro.

La fachada principal está integrada por un sistema constructivo en sillar de piedra con un orden establecido, el aparejo es regular en piezas acomodadas con hiladas a soga, de acuerdo al espesor del muro es probable que este tenga una sección integrada por multihojas con una hoja en cada extremo y varias hojas internas conectadas. Los sillares tienen esquinas redondeadas, el tamaño de las piezas es mediano (35 cm), las juntas de mortero son de 2 cm de promedio. Se observan cuatro tonos de cantera: rosa (S01 y S02), naranja (S06), morada (S04) y blanca (S05). La cantera en mayor porcentaje y con mayor daño debido al intemperismo y a las condiciones de carga es la rosa y naranja ya que muestran patologías como: desgaste y fracturas, respectivamente. De acuerdo a las características mencionadas, el muro tiene un bajo nivel de heterogeneidad.

4.2.4 Resumen de muros de mampostería

En la siguiente tabla se presentan las características de los muros de mampostería. Contiene el nombre o tipo de construcción, la identificación, la fotografía del área de mampostería, la imagen digitalizada de la fotografía hecha con la finalidad de obtener porcentajes por área de acuerdo a la cantidad de piedra y juntas o articulaciones de mortero y ripio. Se hizo una descripción de las características considerando el tipo de aparejo, la mampostería de acuerdo al labrado de los elementos, el tipo de unión entre piezas y el espesor de las juntas, el tipo de sección del muro, el tamaño, la forma de los elementos y el confinamiento del muro. Finalmente se muestran los porcentajes de piedra y juntas.

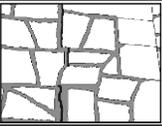
DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA					
CONSTRUCCIÓN	ID	IMAGEN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA	IMAGEN DIGITALIZADA DE MUROS DE MAMPOSTERÍA	CARACTERÍSTICAS	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS ELEMENTOS
CATEDRAL	a)			Mampostería de piedra. Presenta un aparejo con cierto orden, con un procedimiento de unión de las piezas de mampostería ordinaria con textura lisa juntoado con borde sobresalido a 45°. Por el espesor del muro, se integra por dos hojas y relleno central. La forma del aparejo es concertada con desbaste en las caras para facilitar el acomodo, presenta esquineros o espigones en las esquinas de los muros. Existe uniformidad en el espesor de las juntas.	Piedra= 82% mortero= 18%
	b)			Mampostería de piedra. Presenta un aparejo irregular, con procedimiento de unión en piezas en mampostería careada con textura rugosa, con un mínimo trabajo de labrado. En las juntas contiene un alto porcentaje ripio y un mínimo % de mortero. El muro se integra por dos hojas y relleno en el interior de piedra y mortero. La piedra presenta una forma redondeada y larga con acomodo variable (vertical, horizontal y en diagonal), la mayoría de los elementos son de tamaño mediano-grande. Existen variaciones importantes en el espesor de las juntas.	Piedra= 71% ripio-mortero= 29%
	c)			Mampostería de piedra. Presenta elementos prismáticos o sillar de piedra con esquinas redondeadas, con juntas de mortero de 2 cm espesor promedio. Presenta hiladas a soga. Según el espesor del muro, se integra por dos hojas externas y varias hojas internas conectadas.	Piedra= 77.94% mortero= 22.06%

Tabla 1. Descripción de las características y obtención de porcentajes de los tipos de muros encontrados en los edificios históricos del estado de Aguascalientes.

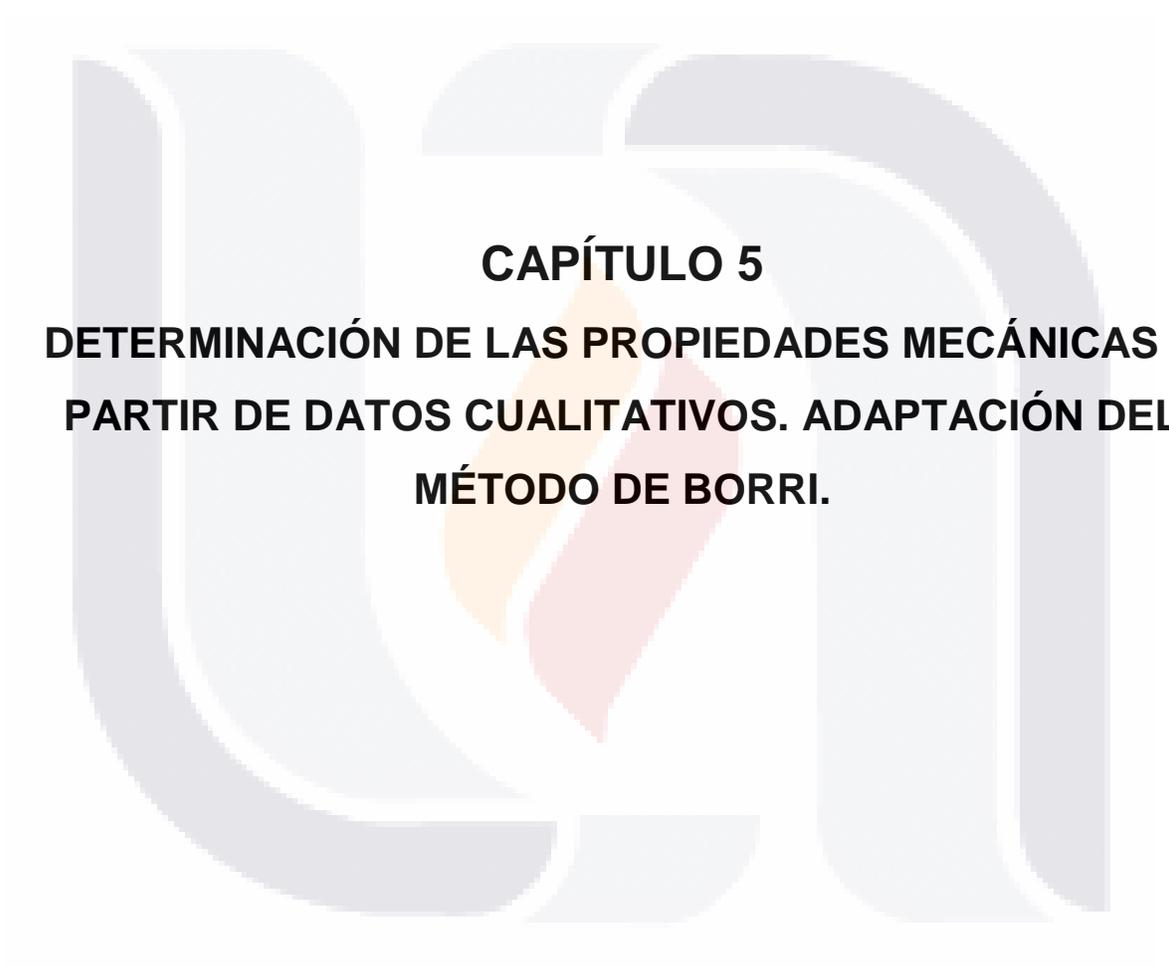
4.2.5 Conclusiones

Con base en la literatura y de acuerdo al estudio de las características de los muros de mampostería de construcciones estudiadas, se concluye que:

Muros con mayor porcentaje de ripio tienen mayor probabilidad de fallar. Caso contrario, los muros con menor porcentaje de ripio y una menor variación en las juntas, tienen una mayor estabilidad y solidez. La roca tiene una alta resistencia a esfuerzos de compresión de manera que el contacto entre cada roca origina un comportamiento de solidez de la estructura, de lo contrario, el muro pierde continuidad en sus elementos lo que causa una distribución variable de cargas e incertidumbre en las condiciones de seguridad estructural (Quelhas et al., 2014).

Muros con rocas sobrepuestas unas con otras, que mantienen una línea continua vertical en las juntas pueden provocar una discontinuidad en el muro o una grieta que ponga en riesgo la permanencia del muro o una disminución en su capacidad de carga. El edificio Catedral presenta esta situación. La mayoría de los muros de los templos construidos antes del siglo XIX, presentan una alta heterogeneidad y mayores dimensiones en la sección. No existe un acomodo o aparejo definido debido al poco trabajo de labrado que se realizaba en las rocas extraídas de los bancos, de manera que la orientación de los hilos de las rocas solo se tomaban en cuenta en la conformación de cerramientos de puertas y ventanas, y en columnas.





CAPÍTULO 5
DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A
PARTIR DE DATOS CUALITATIVOS. ADAPTACIÓN DEL
MÉTODO DE BORRI.

CAPÍTULO 5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A PARTIR DE DATOS CUALITATIVOS. ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE BORRI.

5.1 Introducción

Con la finalidad de obtener una aproximación inicial de las propiedades mecánicas, se buscó proponer una metodología cualitativa que permita conocer valores de compresión, tensión, módulo de elasticidad y módulo de Young, importantes para comprender la capacidad de los muros y las condiciones de esfuerzo a las que se encuentran sometidos. Si bien, existen una serie de datos propuestos por diversas normativas, de los principales tipos de sistemas constructivos empleados en muros de mampostería, no es suficiente ya que cada muro es diferente, aun cuando a simple vista se observen sistemas constructivos similares. Existen una gran cantidad de factores que pueden influir en la determinación de los valores mecánicos, sin embargo el trabajo se enfoca en siete variables importantes, las cuales son: forma del elemento, tamaño del elemento, acomodo vertical y horizontal, encabezados, tipo de juntas y espesor de juntas. Según Kržan (2015), el comportamiento estructural de elementos de mampostería histórica se puede entender conociendo los siguientes factores: geometría, las características de la textura y morfología de la mampostería, el estado de los daños y deterioro, características físicas, mecánicas y químicas de los elementos (unidades, relleno y mortero), así como las características de la mampostería como un material compuesto.

Durante la revisión de trabajos o literatura relacionada con el tema, se obtuvo que D'Ayala y Paganoni (2011) llevaron a cabo una evaluación visual de algunos edificios históricos del centro de Aquila, en Italia y en los pueblos cercanos de Paganica y Onna. Kržan et al., (2015) propuso un método interesante para clasificar la calidad de mampostería sobre la base de un análisis visual-mecánico. Así mismo, Borri (2015) desarrolló un método basado en la evaluación parámetros presentes o ausentes, es decir técnicas o recursos constructivos que al ser empleados durante la construcción de los elementos de mampostería resultan en un buen comportamiento y asegura una adecuada integración de las piezas (monoliticidad del compuesto). Posteriormente Rovero (2015), lleva a cabo la implementación del método propuesto por Borri para la estimación de las propiedades mecánicas en estructuras de Casentino y aldeas de Sant'Eusanio Forconese (L'Aquila Italia) con el fin de apoyar en la protección y reconstrucción de las estructuras.

El uso de esta metodología implica un amplio conocimiento de los sistemas constructivos en elementos de mampostería y de las propiedades físicas, mecánicas, petrográficas y petrológicas, así como la química, de los materiales empleados, ya que el análisis de los factores se fundamenta principalmente en la observación in situ y datos obtenidos de fotografías, por lo que el dominio de los temas ya mencionados es de suma importancia para la determinación de los parámetros y adecuación de los mismos para una mayor aproximación a sus características mecánicas reales.

La obtención de las características mecánicas con métodos convencionales resulta en un largo y complicado proceso ya que generalmente se deben implementar una gran cantidad de pruebas para obtener datos característicos de las zonas representativas de los diferentes sistemas constructivos y de las condiciones de esfuerzo a las que se encuentran sometidos, con el fin de entender el comportamiento de los elementos de mampostería que constituyen la edificación, así como las características que permiten su conexión e integración (Bosiljkov et al., 2010). Una de las características principales de la mampostería, que es de gran importancia en la obtención de las propiedades mecánicas es la heterogeneidad. Es decir, la diversidad de los sistemas constructivos y las diferentes propiedades de los materiales empleados son fundamentales tanto en la implementación de las pruebas a realizar como la interpretación y análisis de los resultados, una alta heterogeneidad implica mayor incertidumbre en el comportamiento del edificio. Según Kržan (2015) la complejidad de los antiguos edificios de mampostería, a menudo sometidos a muchas transformaciones durante su tiempo de vida, requeriría una investigación detallada de casi todos los elementos estructurales, ya que es difícil extender los datos adquiridos en un solo punto a otras partes del edificio.

Otro factor a considerar es, la antigüedad del edificio, ya que debido a las condiciones de exposición se generan cambios significativos en las características originales de cada uno de los materiales, sobre todo en la zona superficial o expuesta a intemperización. Este último factor, debe ser tomado en cuenta en la determinación de los parámetros a partir de muestras extraídas de bancos de materiales o mediante el uso de materiales similares a los empleadas en la construcción, de manera que no se garantizan resultados confiables puesto que el proceso de envejecimiento del edificio y el deterioro no pueden ser simulados en laboratorio de forma adecuada.

Los métodos para la obtención de los parámetros mecánicos se dividen en dos tipos: los métodos no destructivos y los métodos invasivos. Dentro de los métodos no destructivos se encuentran el método del martillo de rebote para determinar la resistencia a compresión uniaxial, el método de velocidad de pulso ultrasónico para obtener el módulo de deformación de los materiales, la tomografía sísmica para conocer el módulo de elasticidad y el método del flat Jack para analizar el estado tensional de una zona de la estructura, así como módulo de deformación y coeficiente de Poisson. Los métodos invasivos son la prueba a compresión para conocer la resistencia a la compresión, prueba de Brasil para la resistencia a la tensión indirecta, entre otras pruebas; haciendo uso de muestras representativas obtenidas mediante la extracción de núcleos, de elementos restituidos en los trabajos de restauración, obtenidas de bancos de materiales de donde pertenece la roca o bancos con características similares a la original.

5.2 Metodología y materiales

Con la implementación del método, en una etapa preliminar, se busca la posibilidad de obtener datos con mayor rapidez y confiables para la toma de decisiones que posteriormente puedan ser confirmados durante una etapa experimental, logrando una disminución del tiempo y un mayor entendimiento del edificio. El trabajo desarrollado consiste en la estimación de los valores mecánicos basados en el método de Borri para la obtención del ICM con el objetivo de realizar una valoración previa y entender las condiciones de esfuerzo de las estructuras. Son siete los parámetros considerados en la estimación de las propiedades mecánicas de los muros de mampostería, a estos parámetros propuestos por Borri se agrega un parámetro más considerado igual de importante que los anteriores, el cual se explicará más adelante. Bajo un alto nivel de conocimientos en los sistemas constructivos de edificios históricos, los parámetros son clasificados en tres resultados: Cumple (C), Parcialmente Cumple (PC) y No Cumple (NC).

Los parámetros a considerar se describen a continuación:

SM. Se refiere a las propiedades mecánicas y el estado de conservación de la piedra y el ladrillo (tabla 2). La clasificación NC considera ladrillo y barro sin cocer con bajos valores en el rango de 0.5 a 5 MPa. PC considera muros con resistencia a la compresión de 20.5 Mpa dentro de los cuales se ubican los muros de mampostería de piedra como tobas y

areniscas. La roca dura se ubica en la clasificación C. Para hacer una adecuada clasificación en este primer parámetro es importante tomar en cuenta la contaminación, contenido de humedad y la temperatura, así como el fenómeno de la erosión, ya que pueden disminuir en gran medida las propiedades del material. Este efecto de la erosión se vuelve más notorio en materiales como la toba debida al alto porcentaje de porosidad.

Propiedades mecánicas y estado de conservación (SM)	
NC	Elementos degradados / dañadas (> 20% del número total de elementos)
PC	Presencia de elementos degradados / dañados ($\geq 10\%$, $\leq 20\%$)
	Roca ígnea de tipo Ignimbrita
C	Elementos degradados / dañados (<10%)
	Bloques de hormigón
	Roca dura

Tabla 2. Propiedades mecánicas y estado de conservación.

SD. Se realiza un análisis de las dimensiones de la piedra (tabla 3). Elementos de mayor dimensión aportan mayor estabilidad en un muro de mampostería que un muro conformado con elementos pequeños.

Criterios para el análisis de las dimensiones de la piedra (SD)	
NC	La presencia de más de 50% de elementos de tamaño pequeño (<20 cm)
PC	La presencia de más de 50% de elementos de tamaño mediano (20-40 cm)
	Existencia de elementos de diferentes dimensiones
C	La presencia de más de 50% de elementos con gran tamaño (> 40 cm)

Tabla 3. Criterios para el análisis de las dimensiones.

SS. Forma de la piedra (tabla 4). La forma varía de guijarros a elementos labrados (sillar de piedra).

Criterios para el análisis de la forma de la piedra (SS)	
NC	Mampostería de escombros redondeado (predominante) en ambas hojas de mampostería
PC	Presencia de escombros, piedra redondeada o de guijarros / piedra perfectamente cortada en ambas hojas de mampostería
	Solo una hoja de mampostería de piedra perfectamente cortada
	Mampostería de piedra irregular (escombros, redondeado, guijarros) piedras, pero con presencia de piedras fijas.
C	Piedras perfectamente cortadas en ambas hojas de mampostería

Tabla 4. Criterios para el análisis de la forma.

WC. La conexión entre las hojas que integran el muro es de consideración ya que el comportamiento del muro es muy diferente en muros con hojas conectadas, mejorando la reacción ante condiciones de carga debido a su comportamiento como elemento monolítico. En elementos donde no es visible la sección, se supone un resultado NC para el caso donde no existen cabeceras a tizón. Para paredes de piedra de doble hoja se propone un resultado PC, la doble hoja se asume cuando el espesor de la pared es mayor que la mayor dimensión la piedra y cuando existe un número limitado de cabeceras a tizón. En el caso de C se considera cuando existe una presencia sistemática de cabeceras y cuando el espesor de la pared es similar a la piedra (tabla 5).

Criterios para el análisis de las conexiones de las hojas del muro (WC)	
Sección invisible (análisis cualitativo)	
NC	Piedras pequeñas en comparación con la pared de espesor
	No hay cabeceras a tizón
PC	Para pared de doble hoja
	Presencia de algunas cabeceras a tizón
	Grosor de la pared más grande que la piedra de grandes dimensiones
C	Grosor de la pared similar a la piedra de grandes dimensiones
	Presencia sistemática de las cabeceras

Tabla 5. Criterios para el análisis de las conexiones de las hojas del muro.

HJ. Consiste en la evaluación de las características de las juntas o camas horizontales (tabla 6). Este factor influye sobre todo en la resistencia lateral y a compresión de un muro de mampostería.

Criterios para el análisis de la horizontalidad de las juntas (HJ)	
NC	No existe continuidad en juntas
PC	No existe continuidad en juntas
	Para paredes de doble hoja
	Sólo una hoja con juntas horizontales continuas
C	Existe continuidad en juntas

Tabla 6. Criterios para el análisis de la horizontalidad de las juntas. Modificada de Borri.

VJ. Consiste en revisar las juntas verticales en muros, es decir, si existe un adecuado escalonamiento, un mediano escalonamiento o nulo escalonamiento (tabla 7). Para este factor, en caso de muros de dos o más hojas, es necesario evaluar ambas hojas exteriores.

Criterios para el análisis de las propiedades de escalonamiento de las juntas verticales (VJ)	
Análisis cualitativo	
NC	Juntas verticales alineadas
	Juntas verticales alineadas en al menos 2 grandes piedras
PC	Juntas verticales parcialmente escalonadas
C	Juntas verticales debidamente escalonadas
	La junta vertical se presenta entre 2 piedras y una piedra intermedia centrada en la parte superior e inferior adyacente

Tabla 7. Criterios para el análisis de las propiedades de escalonamiento de las juntas verticales

MM. Relacionado con las propiedades mecánicas del mortero (tabla 8). La relación en las proporciones del aglutinante tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas del mortero. Es importante observar la unión entre el mortero y la piedra.

Criterios para el análisis de las propiedades de mortero (MM)	
NC	Mortero débil, fácilmente deleznable sin cohesión.
	Sin mortero.
	Grandes juntas horizontales hechas de mortero débil (espesor comparable a la piedra).
	Piedras porosas con unión débil al mortero.
PC	Mortero de mediana calidad, con las juntas de cama sin muescas de gran medida.
	Mampostería hecha de piedras irregulares (escombros) y mortero débil, con presencia de piedras fijas.
C	Mortero de buena calidad sin degradación, espesores regulares en camas o largos espesores de juntas hechas de mortero de muy buena calidad.
	Mampostería hecha de grandes piedras perfectamente cortadas sin mortero o espesores muy delgados de cama.

Tabla 8. Criterios para el análisis de las propiedades de mortero

JT. Los espesores de juntas deben ser tomados en cuenta debido a la característica de heterogeneidad de los muros de mampostería y a la forma irregular de los elementos, lo que genera variaciones importantes de las juntas las cuales pueden estar rellenas con mortero cal-arena, mortero cemento-arena, mortero ripio o a hueso (tabla 9). Este factor provoca fuertes variaciones en las distribuciones de esfuerzo sobre el muro y una posible concentración de esfuerzos sobre algunas zonas lo que puede provocar zonas críticas de falla.

Criterios para el análisis de los espesores de juntas (JT)	
NC	Grandes variaciones en los espesores de las juntas
	Fuertes variaciones en los espesores de juntas verticales
	Espesores mayores a 6 cm relleno de ripio con acomodo variable (vertical y horizontal).
PC	Variaciones mínimas en los espesores de juntas verticales y horizontales
	Variaciones medianas en espesores de las juntas con alta densidad de ripio con acomodo horizontal
	Espesores de juntas o articulaciones regulares de hasta 6 cm, incluye alta densidad de ripio con acomodo horizontal en gran porcentaje
C	Espesores rellenos de ripio
	Predominio de espesores mínimos (≤ 3 cm) principalmente en camas horizontales

Tabla 9. Criterios para el análisis de los espesores de juntas

Este último factor no existe en el método de Borri, sin embargo es importante el análisis de las variaciones de las juntas horizontales y verticales debido a las implicaciones en el comportamiento mecánico del muro. La mampostería de piedra de la región zona centro del país presenta espesores que van del rango de 0.5 cm hasta 10 cm, lo cual representa una fuerte variación en el espesor de las juntas. Como ya se mencionó, este factor podría generar un patrón de agrietamiento o una falla estructural debido a una mala distribución de esfuerzos producto de una fuerte variación entre las juntas. De acuerdo con Kržan (2015), las juntas de mortero al ser consideradas como planos de debilidad dentro del compuesto de mampostería, el espesor, las propiedades elásticas y la proporción del volumen de las juntas influyen significativamente en el comportamiento a la compresión de un conjunto de mampostería. Entre más delgadas las juntas de mortero en relación con la altura de las unidades de mampostería, mayor resistencia presentará el elemento. Sin embargo, los espesores de las juntas de mortero deben ser lo suficientemente delgadas, es decir no deben tocarse entre sí, con el objetivo transmitir uniformemente los esfuerzos entre piedras. Capas delgadas de mortero implican mayor resistencia a la compresión, lo que dependerá básicamente del tipo de piedra a utilizar.

Los ocho factores mencionados son ponderados bajo tres diferentes condiciones de carga. Las condiciones se dividen en acciones verticales, acciones dentro del plano y acciones fuera de plano (figura 27). Las ponderaciones son del rango de 0 a 3, de acuerdo a la afectación de los factores con respecto a cada una de las situaciones de carga (ver tabla 1. a), 1. b) y 3 en el apéndice A). Así mismo, las cargas estéticas fuera de plano sobre un muro dependen en gran medida de la cantidad de hojas que lo integren. Lo anterior se representa en la figura 28 donde se muestra la afectación de una carga fuera de plano sobre un muro con una, dos y tres hojas en su sección. En la imagen se muestra que un muro de una hoja opone mayor resistencia a un muro con dos o más hojas.

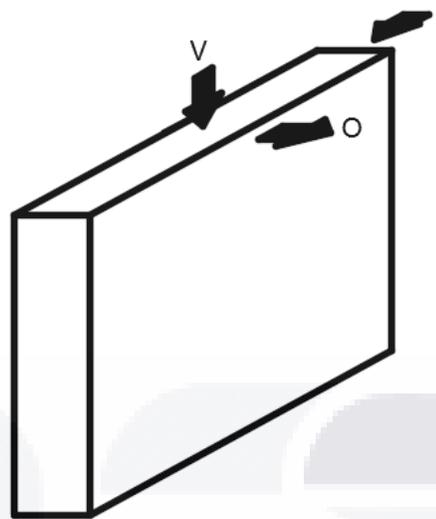


Figura 27. Condiciones de carga: “V” cargas estáticas verticales, “O” carga estática y dinámicas fuera de plano, “I” cargas dinámicas dentro de plano.

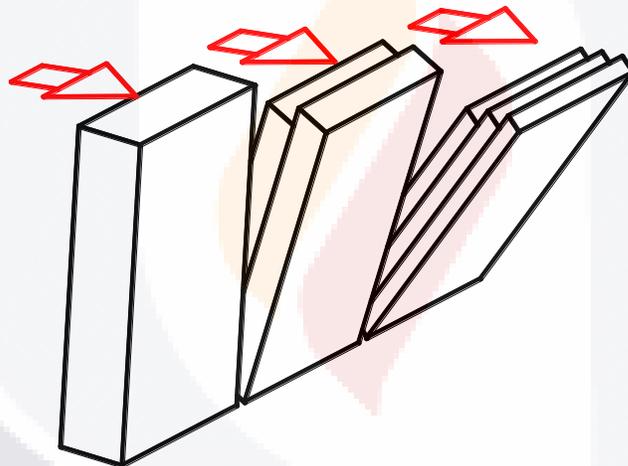


Figura 28. Afectación de una condición de carga fuera de plano para muros con una, dos y tres hojas en su sección.

La evaluación se llevó a cabo sobre los nueve tipos de muros de mampostería que corresponden a la catedral de Aguascalientes, la antigua troje de Ciénega Grande, la iglesia de Palo Alto, el templo de San Isidro, el museo de Tepezalá, la presa de Tepezalá y la antigua fábrica de cal. En la figura 29 se muestran los tres tipos de mampostería con mejor ICM. En cada uno de los muros se valoraron los ocho parámetros según las condiciones de cargas (verticales, horizontales dentro de plano y horizontales fuera de plano). En tabla 10 se muestran los valores numéricos para los ocho factores evaluados por la acción de carga vertical.

Construcción	ID	Carga Vertical (V)								
		SM	SD	SS	WC	HJ	VJ	MM	JT	IQM
Catedral de Aguascalientes	a	PC	PC	C	PC	PC	PC	C	C	
		0.7	0.5	2	1	0.7	0.5	1	1.5	5.04
	b	PF	PC	PC	C	NC	NC	PC	PC	
		0.7	0.5	1.5	1.5	0	0	1	1	3.85
	c	PC	PC	C	PC	C	C	C	C	
		0.7	0.5	2	1	1	1	1	1.5	5.6
Troje de Ciénega	d	PC	PC	PC	PC	NC	PC	PC	NC	
		0.7	0.5	1.5	1	0	0.5	1	0	3.15
Iglesia de Palo Alto	e	C	PC	PC	C	NC	NC	PC	NC	
		1	0.5	1.5	1.5	0	0	1	0	4.5
Templo de San Isidro	f	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC	
		0.7	0.5	1.5	1	0.7	0.5	1	0	3.64
Museo de Tepezalá	g	PC	PC	NC	PC	NC	NC	NC	NC	
		0.7	0.5	0	1	0	0	0	0	1.05
Presa de Tepezalá	h	PC	C	PC	C	PC	PC	PC	PC	
		0.7	1	1.5	1.5	0.7	0.5	1	1	5.04
Fábrica de cal	i	PC	PC	PC	PC	NC	NC	NC	PC	
		0.7	0.5	1.5	1	0	0	0	1	2.8

Tabla 10. Ponderación propuesta para la evaluación de los nueve tipos de muros de mampostería bajo la acción de carga vertical.



Figura 29. Muros con mejor ICM. A) Muro “a” de la catedral de Aguascalientes con valor de 5.04. B) Muro “c” de la catedral de Aguascalientes con valor de 5.6. C) Muro “h” de la presa de Tepezalá con valor de 5.04.

Al obtener los valores numéricos por cada factor, el índice de calidad de mampostería resulta con la siguiente fórmula aritmética (Ec. 1):

$$ICM = SM (SD + SS + WC + HJ + VJ + MM + JT) \quad Ec. 1$$

El valor máximo de 10 resulta en el caso de obtener C (cumple) en todos los parámetros de la ecuación de calidad, independientemente de la condición de carga. Posteriormente el ICM se clasifica en tres categorías (tabla 11):

- A: buen comportamiento de la mampostería
- B: comportamiento regular de acuerdo a una calidad media de la mampostería
- C: comportamiento inadecuado de la mampostería.

Categorías de mampostería			
Condiciones de carga	C	B	A
Carga vertical (V)	$0 \leq ICM \leq 2.5$	$2.5 \leq ICM \leq 5$	$5 \leq ICM \leq 10$
Carga horizontal dentro del plano (I)	$0 \leq ICM \leq 4$	$4 \leq ICM \leq 7$	$7 \leq ICM \leq 10$
Carga horizontal fuera del plano (O)	$0 \leq ICM \leq 3$	$3 \leq ICM \leq 5$	$5 \leq ICM \leq 10$

Tabla 11. Categorías de mampostería.

5.3 Resultados

Después de obtener el ICM, se procedió a realizar un proceso de correlación de valores para la obtención de valores mecánicos. Con base en valores establecidos por el Código de construcción Italiana para 6 diferentes tipologías de mampostería (ver tabla 3 en el apéndice A). La tabla 12 presenta datos máximos y mínimos de resistencia a la compresión, resistencia a la cizalladura, módulo de Young, módulo de corte y densidad de peso. Para obtener datos mecánicos de tipologías diferentes a las mostradas en la tabla, Borri propone una tabla en donde se consideran factores en función de la calidad de mortero, espesor de la juntas, conexiones entre hojas (existencia de cabeceras), debilidad del mortero y/o el ancho del núcleo interno, inyecciones de cemento y ferrocemento (ver tabla 3. a) en el apéndice A). Con la combinación de los valores es posible obtener las propiedades mecánicas de 36 tipologías de muros de mampostería.

Finalmente el ICM es multiplicado por los valores mecánicos obtenidos de la tabla del IMIT.

Nombre de la construcción	Id	ICM	Resistencia a la compresión	Resistencia a la cizalladura	Módulo de Young	Módulo de corte	Densidad de Peso
			Fm (MPa) mínimo máximo	τ_o (MPa) mínimo máximo	E (MPa) mínimo máximo	G (MPa) mínimo máximo	W (kN / m ³)
Catedral Basílica	a)	5.04	5.98	0.1288	3450	1150	21
			8.74	0.1702	4,554	1518	
	b)	3.85	3	0.0525	1530	510	20
			4.5	0.0765	2,160	720	
	c)	5.6	13.8	0.207	5520	1794	22
			18.4	0.276	7360	2162	
Troje	d)	3.15	1	0.02	690	230	19
			1.8	0.032	1050	350	
Iglesia de Palo Alto	e)	4.5	1.3	0.026	897	299	19
			2.34	0.0416	1365	455	
Templo de San Isidro	f)	3.64	1.3	0.026	897	299	19
			2.34	0.0416	1365	455	
Museo de Tepezalá	g)	1.05	0.7	0.014	483	161	19
			1.26	0.0224	735	245	
Presa de Tepezalá	h)	5.04	1.82	0.0364	1170	390	16
			3.12	0.0546	1,638	546	
Fábrica de cal	i)	2.8	0.7	0.014	483	161	19
			1.26	0.0224	735	245	

Tabla 12. Tabla de obtención de valores mecánicos mediante el ICM

Los valores mecánicos máximos y mínimos se grafican para después obtener la ecuación de regresión exponencial, la cual permitirá solo sustituir valores de calidad de mampostería (ICM) para obtener los datos mecánicos de resistencia a la compresión, resistencia al corte, módulo de Young y Módulo de cortante de los tipos de mampostería (figura. 1, 2, 3 y 4, Apéndice A). La tabla 13 presenta los datos mínimos y máximos de resistencia a la compresión y Módulo de Elasticidad del ICM mínimo (muro de mampostería del museo de Tepezalá) y máximo (muro de sillar de piedra de la Catedral de Aguascalientes).

IMIT & ADECUACIÓN						
	Valores de Fórmula		ICM	Fm (MPa)	Kg/cm2	Fórmula
Resistencia a la compresión mínima Fm (MPa)	0.1983	1.9670107	1.05	0.3900582	3.90058	$y = 0.1983e^{0.6443x}$
Resistencia a la compresión máxima Fm (MPa)	0.3727	23.218747	5.04	8.6536269	86.5363	$y = 0.3727e^{0.624x}$
Módulo de Young mínimo E (MPa)	164.22	1.810241	1.05	297.27778	2972.78	$y = 164.22e^{0.5652x}$
Módulo de young máximo E (MPa)	249.15	17.324748	5.04	4316.461	43164.6	$y = 249.15e^{0.5659x}$

Tabla 13. Obtención de valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión y módulo de Young mediante la implementación de la ecuación de regresión exponencial.

5.4 Conclusiones

Los valores mecánicos obtenidos mediante la obtención de un Índice de Calidad de Mampostería resultan dentro del rango de los valores mecánicos considerados en la Norma Técnica Complementaria de Mampostería (NTCM). Aun cuando en una observación inicial es posible suponer el muro con mejores características mecánicas, es importante conocer datos mecánicos previos evaluados a partir de sus principales propiedades derivadas de las técnicas empleadas en su construcción.

CAPÍTULO 6

CARACTERIZACIÓN DEL DETERIORO DE LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA CATEDRAL BASÍLICA DE AGUASCALIENTES

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DEL DETERIORO DE LA ROCA DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA CATEDRAL BASÍLICA DE AGUASCALIENTES.

6.1 Introducción

La piedra es uno de los materiales más antiguos empleados para la construcción de casas, monumentos y edificios diversos. Su uso como elemento estructural tiene registro hace más 5000 años (Casar, 2002). Las rocas se han utilizado como material para elaborar elementos estructurales de mampostería en el patrimonio edificado. Comúnmente, la extracción de rocas tuvo lugar cerca de las construcciones debido a la escasa tecnología entonces disponible tanto para la extracción de rocas como su transporte al lugar en el que estas rocas se usaron como material de construcción. Como consecuencia, se utilizaron rocas con propiedades mecánicas bajas para resistir agentes atmosféricos en la mayoría de las construcciones de mampostería (Stenthlage, 2014).

Los edificios patrimoniales experimentan deterioro a lo largo del tiempo debido a efectos naturales y antropogénicos (es decir, fuego, efectos de guerras, falta de mantenimiento, lluvia, viento, efectos sísmicos, etc.). Debido a que los efectos atmosféricos son inevitables y constantes a lo largo de la vida de los edificios, la intemperización en mampostería es posiblemente el daño más común en los edificios patrimoniales (Feilden, 2007, Siegesmund et al., 2002). Otro efecto recurrente en muchos edificios históricos de mampostería es la humedad por capilaridad, que es la ascendencia del agua en la base de los muros (Guimarães et al., 2016, Franzoni et al., 2014; Rirsch y Zhang, 2010; Feilden, 2007). La intensidad del clima y el efecto de la humedad ascendente sobre la mampostería dependen de las propiedades mecánicas de las piedras y del mortero. Depende de tal manera que la permanencia en el tiempo de algunos edificios históricos está relacionada con la alta calidad de la roca y el mortero de mampostería utilizado en su construcción (Siegesmund et al., 2002).

La investigación sobre el deterioro y la preservación de la mampostería comenzó en el siglo XIX. Una de las líneas de investigación que recientemente ha ganado interés es la investigación sobre los cambios en las propiedades mecánicas de la piedra a través del tiempo, ya que proporciona información sobre la durabilidad de la mampostería de piedra (Ahmad, 2012).

La determinación del deterioro de la mampostería de piedra implica una evaluación detallada de las características de la piedra y un estudio para determinar los efectos perjudiciales a los que las construcciones históricas han sido expuestas a lo largo de su historia. La interacción entre las propiedades mecánicas y químicas de la roca con los diferentes agentes se vuelve complejo. En consecuencia, la información completa sobre la condición de deterioro de la mampostería de piedra depende de varios parámetros y factores relacionados entre sí. Por lo tanto, se necesita un análisis exhaustivo para obtener información más realista sobre el nivel de deterioro de las piedras (Nicholson, 2001).

Varios tipos de piedras naturales se han utilizado para elaborar edificios históricos de mampostería. Sin embargo, en el centro de México la gran disponibilidad de rocas volcánicas favorece su uso en construcciones de mampostería de piedra. Entre las rocas volcánicas utilizadas en las construcciones históricas, las tobas pobremente soldadas han sido las más utilizadas debido a su bajo peso volumétrico y a la facilidad de corte, labrado y trabajabilidad (Fitzner, 1994).

Desafortunadamente, el bajo peso volumétrico de las tobas está relacionado con la alta porosidad. Por lo tanto, las tobas presentan comúnmente propiedades mecánicas bajas (es decir, una fuerza de baja tensión de 1 a 4 MPa y una fuerza de compresión de 10 a 45 MPa, según Siegesmund y Snethlage (2014), Kılıç y Teymen (2008), Rahn (1986)) y propiedades hidráulicas que favorecen la humedad por capilaridad del suelo y del agua de la atmosfera.

Los edificios históricos en Aguascalientes fueron hechos del siglo XVI al XX. Se construyeron de mampostería compuesta por rocas volcánicas principalmente tobas. Como consecuencia, varios edificios presentan daños y deterioro de la mampostería, principalmente en la base de paredes debido a la humedad, que favorecen la cristalización de la sal. A su vez, la cristalización de la sal ha favorecido el desarrollo de la degradación que integran los muros de la catedral, como *flaking and scaling*, *black crusts* (figura 30).



Figura 30. Deterioro de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes debido a la intemperización y a la humedad. A) *Black crusts*, *soiling*, *scratch*, áreas húmedas y humedad ascendente en la pared al lado derecho del acceso principal al templo. B) *Black crusts* y contaminación por residuos humanos, suciedad y humedad ascendente en el fondo de la pared en el lado derecho de la puerta de acceso. C) y D) Humedad ascendente y flaking en rocas de la pared norte.

Se desarrolló una caracterización petrográfica de las rocas que forman los muros de mampostería de la Catedral de la ciudad de Aguascalientes (figura 31). Se llevaron a cabo pruebas in situ y de laboratorio para determinar la susceptibilidad al deterioro de las piedras de mampostería debido a los efectos de la humedad ascendente. Los objetivos de estudio fueron identificar el tipo de piedra más susceptible al deterioro y determinar el grado de deterioro actual de las piedras en varios puntos de las paredes exteriores del edificio.



Figura 31. Imagen de la fachada de la Catedral Basílica de la ciudad de Aguascalientes.

6.2 Metodología y materiales

Debido a que la Catedral de Aguascalientes es considerada un monumento histórico protegido, se restringe el muestreo de las rocas originales del edificio a pocas y pequeñas piezas, tomadas de material reemplazado en diferentes obras de restauración. La muestra identificada como S01 pertenece a la toba de la Barranca, las muestras S02, S04 y S05 pertenecen al grupo de la toba de Valladolid; así como la muestra S03, utilizada en restauraciones actuales, se obtuvo de una cantera de San Miguel el Alto y finalmente la muestra S06 solo se analizó in situ. Se utilizaron principalmente tres tipos de roca en el edificio estudiado (toba de la Barranca, toba de Valladolid y toba de San Miguel el Alto). La roca original utilizada fue de más de cien años, rocas volcánicas rosáceas, extraídas de la región de Barranca, cerca de la ciudad de Aguascalientes (muestra S01, tabla 14). En obras de antiguas restauraciones se utilizó otra roca similar procedente de la localidad de Valladolid municipio de Jesús María, Aguascalientes (toba de Valladolid, muestras S02, S04 y S05, tabla 14). Por último, en el año 2014 se realizaron trabajos de restauración en la torre norte de la Catedral, utilizando una roca de reemplazo muy comercial (San Miguel el Alto, muestra S03), que ha sido ampliamente utilizada en México en los últimos años. Esta roca proviene de los alrededores de San Miguel El Alto en el estado de Jalisco (muestra S03, tabla 14). Las rocas volcánicas de San Miguel El Alto ya han sido descritas en la literatura (Wedekind et al., 2011, 2013). Algunas características macroscópicas de las rocas de construcción de la Catedral de Aguascalientes como color, tamaño y forma de los clastos, así como el tipo de matriz se muestran en la tabla 14. Se realizó una caracterización petrográfica macroscópica "in situ" de las piedras expuestas en las paredes exteriores del edificio estudiado a través de una cartografía litológica. Los datos de color, grano y características de la matriz y el nivel de deterioro y descomposición se registraron en 48 puntos examinados en las paredes de la Catedral (tabla 14).

Piedra	Color	Contenido aprox. de grano (%)	Forma de grano	Tamaño de grano (cm)	Grado de deterioro
S01	Rosa oscuro	20	Semirendondeado	0.2-0.8	Moderado
S02	Rosa	10	Redondeado	0.1-0.4	Moderado
S03*	Rosa claro	< 5	Redondeado	0.1-0.3	Bajo
S04	Morado	< 5	Redondeado	0.1-0.3	Moderado
S05	Blanca-morada	< 5	Redondeado	0.1-0.3	Moderado
S06	Naranja oscuro	< 5	Redondeado	0.1-0.3	Bajo

Tabla 14. Características litológicas de piedras identificadas en la mampostería de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes. * Piedra S03 es un material "fresco" que se utilizó para reemplazar las piedras más deterioradas en las obras de restauración a lo largo de los últimos 30 años.

Se aplicaron las pruebas del tubo Karsten, de absorción de agua, la de distribución de los radios de poro y las pruebas de laboratorio de cristalización de sales, en muestras de piedra cúbica (6.5 cm x 6.5 cm x 6.5 cm) extraídas de la mampostería del edificio estudiado. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

6.3 Petrografía de las muestras recolectadas

Durante el estudio de la Catedral de Aguascalientes se tomaron muestras de la roca original (toba de Valladolid y toba de Barranca) y de la roca de reemplazo (toba de San Miguel el Alto) utilizadas durante las restauraciones para análisis petrográfico bajo microscopio. Todas las rocas estudiadas muestran una apariencia similar pero petrográficamente muestran algunas variaciones importantes.

La roca de construcción original (toba de la Barranca, muestra S01, figura 32A) es una roca volcánica rosácea ligera, con una matriz cristalina a vítrea (50% - 60%) donde están incrustados cristales de cuarzo idiomórficos gruesos de 0.5 – 1.0 mm (10% - 15%) alargados a oblatos, cristales de feldespatos gruesos de 0.5 mm alterados (10%). Los feldespatos son principalmente sanidina (figuras 32B y C). 5% a 10% de clastos tienen

una longitud de 1 mm a 3 mm, pómez sin colapsar o parcialmente colapsada. Esta roca toba muestra bajo el microscopio una matriz incipientemente desvitrificada de fragmentos de vidrio (figura 32B), que bajo luz polarizada se presenta totalmente opaca (figura 32C). La textura de esta roca volcánica es vítrea (riolítica sin soldar). Esta roca se clasifica después Fisher (1966) como toba Lapilli / piedra Lapilli.

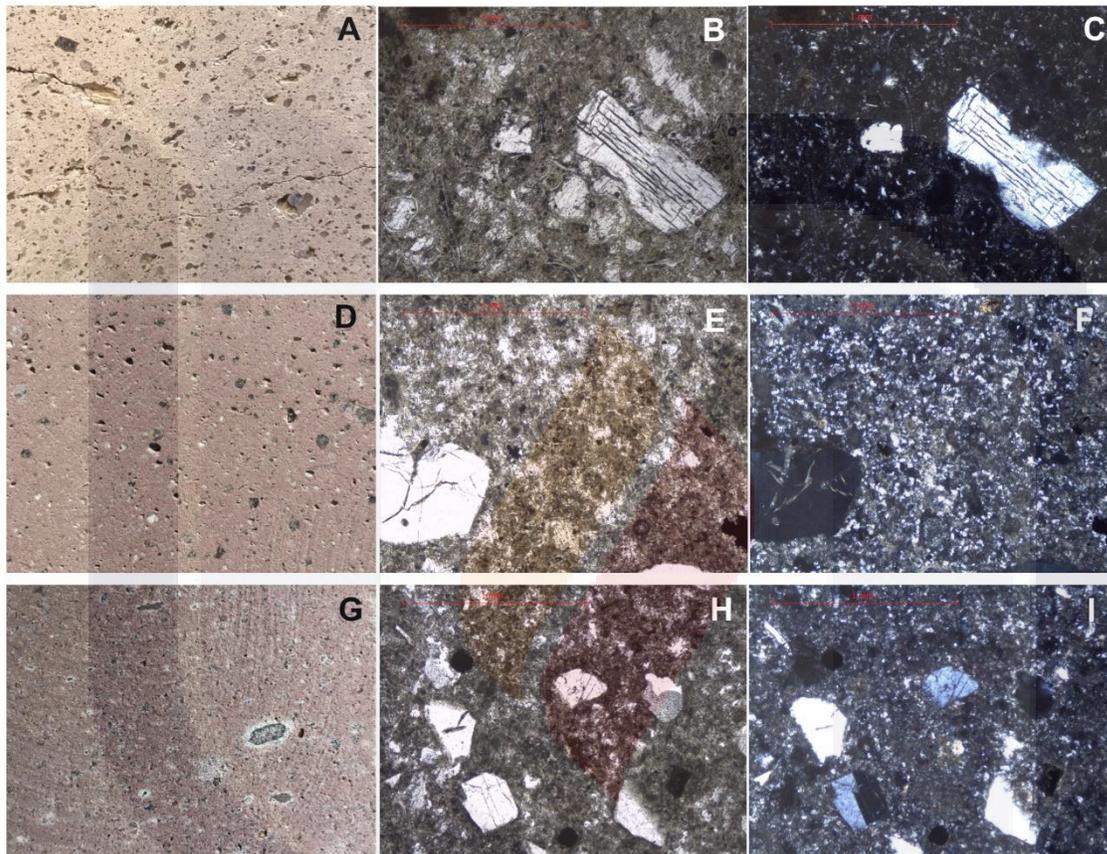


Figura 32. Comparación entre las rocas originales de Barranca (A, B y C) y las rocas de reemplazo de Valladolid (D, E y F) y San Miguel El Alto (G, H e I). Las diferencias en textura y composición mineral son claras de reconocer (explicación en el texto).

A, D y G: Aspecto macroscópico de las muestras en especímenes de mano. Longitud de las muestras 5 mm.

B, E y H: Microfotografías de las rocas de toba estudiadas en sección delgada con luz natural. Longitud de la fotografía 2 mm.

C, F y I: Microfotografías de las rocas de tufo estudiadas en sección delgada con luz polarizada. Longitud de la fotografía 2 mm.

La roca de remplazo de Valladolid (muestra S02, S04 y S05, figura 32D) también muestra un color rosáceo pero en general se ve más fino y más oscuro como la roca original. La toba de Valladolid tienen alrededor de 70% - 75% de matrices finas vítreas, matriz fina

donde se incrustan to > 1 mm idiomórficos, cristales de cuarzo porfiríticos (figura 32E y F). Los microcristales de feldespato eútrico (feldespatos K) se distribuyen en toda la roca y representan hasta el 20% del total de la roca. La textura de la roca es claramente vítrea (opaca) a eutaxítica (figura 32F) y la piedra pómez no está presente en la muestra.

La roca utilizada en la última restauración realizada en 2014 es la Cantera Rosa de San Miguel El Alto (figura 32G). Wedekind et al. (2012) la describió como una toba riolita-dacita de rosácea a rojiza (riodacita) con una masa fina y homogénea con la presencia de clastos de piedra pómez parcialmente alterada, de tamaño centimétrico a decimétrico. Los clastos son característicos ya que normalmente su matriz tiene un color rojizo oscuro (figura 32H). La masa superficial hipocristalina fina (completamente opaca) consiste en cuarzo y feldespato, que se intercalan con pequeños fragmentos de vidrio (vitroclastos) (figura 32I).

Los análisis de Difracción de Rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) muestran que todas las piedras usadas producen difractogramas muy similares (figura 33). Todos ellos son muy ricos en cuarzo, característico de las rocas volcánicas ácidas. Debido a la proximidad entre las canteras donde se extrajo la roca de construcción original (toba de la Barranca) y la de reemplazo (toba de Valladolid), sugieren que ambas procedían de la misma formación a pocos kilómetros al oeste de la ciudad de Aguascalientes. Con ayuda de los análisis de XRD es posible determinar que la muestra S01 (toba de la Barranca, figura 33), debido al alto contenido en tridimita, tenía temperaturas más altas como las otras piedras de reemplazo (S02 y S03, figura 33). El enfriamiento de esta roca aparece aparentemente muy rápido, lo que bajo la luz polarizada aparece como una textura vítrea (no soldada). La muestra S02 (toba de Valladolid) presenta un alto contenido en montmorilonita (bentonita) y la muestra S03 (de San Miguel El Alto) tiene caolinita pero carece de tridimita (figura 33).

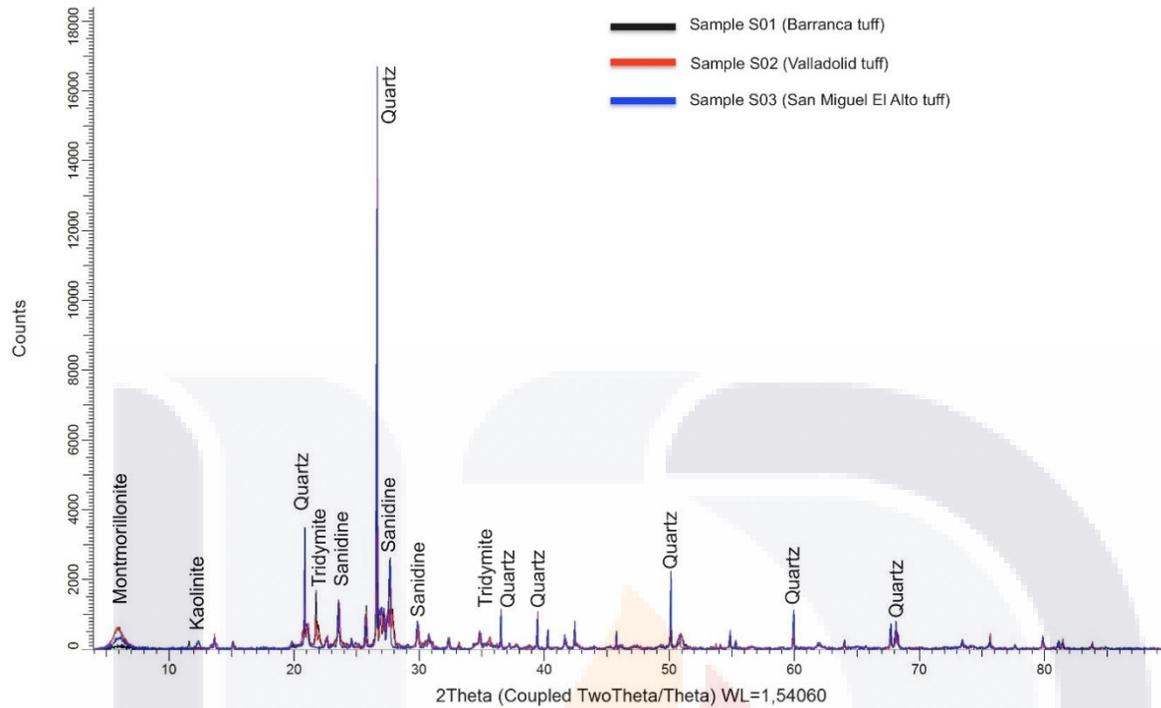


Figura 33. Difractografía de rayos X de la piedra original del edificio (muestra S01) en comparación con las piedras de reemplazo (S02 y S03).

Se llevaron a cabo pruebas petrográficas tanto "in situ" como en laboratorio con el fin de comparar los resultados de piedras intemperizadas y piedras sin alteración extraídas del núcleo.

6.4 Pruebas “in situ”

Se llevaron a cabo 48 ensayos "in situ" de capacidad de absorción (penetración de agua) aplicando el método de tubo de Karsten conocido también como método Rilem según las pruebas RILEM 25-PEM 11.4 (RILEM, 1980) sobre los seis tipos de roca identificados anteriormente descritos. Sin embargo, sólo 26 pruebas produjeron información confiable para caracterizar las 6 tobas identificadas. Este hecho se aborda en la sección de resultados.

Se realizaron pruebas en las caras de piedra expuestas a la intemperie. La pérdida de material producto de la erosión de la piedra se eliminó para la adecuada implementación del ensayo. La localización de los 48 puntos probados se muestra en la figura 34. La implementación de este ensayo se describe esquemáticamente en la figura 35.

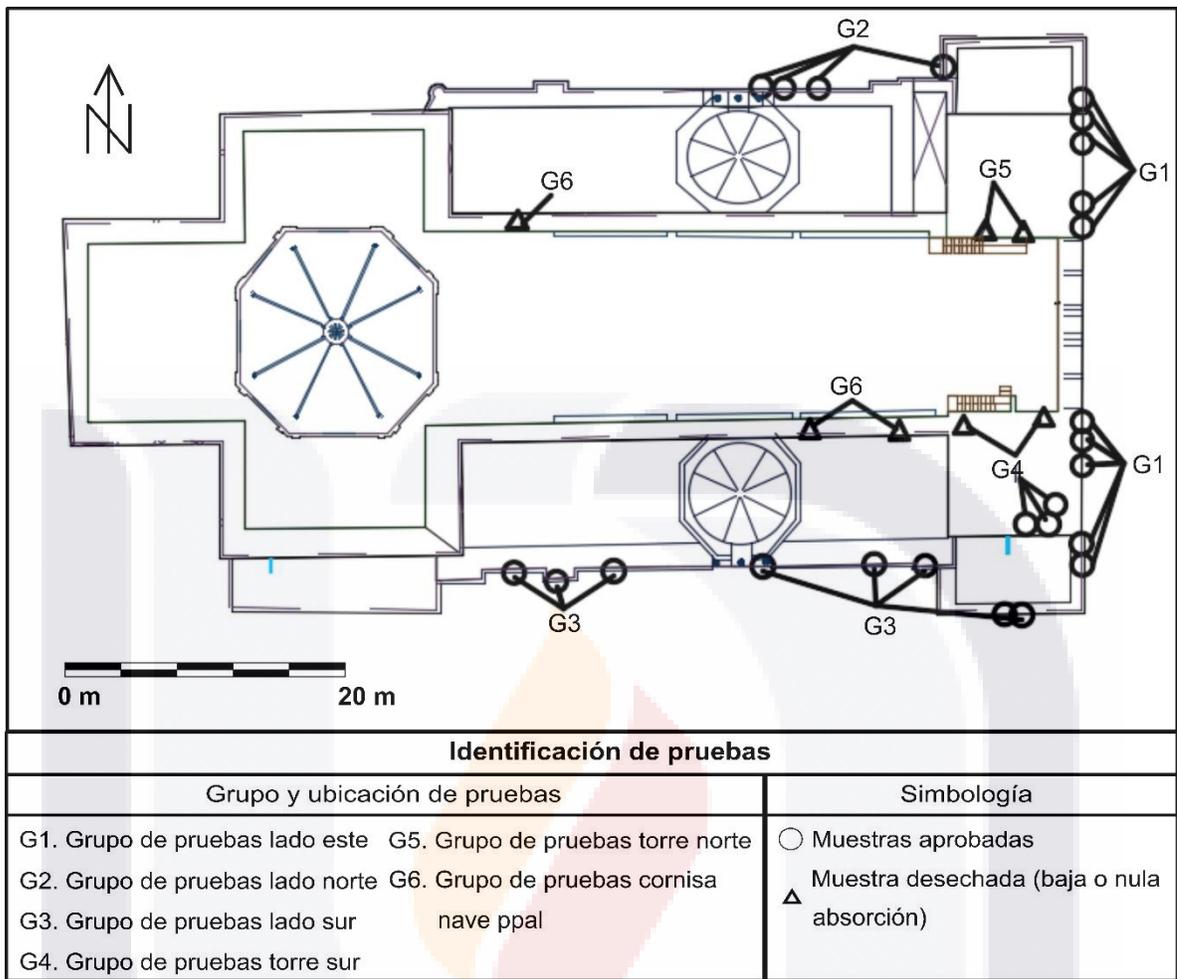


Figura 34. Vista de planta de la Catedral que muestra la ubicación de las pruebas de absorción realizadas en la Catedral. G1: pruebas en el este en la fachada principal, incluye ensayos 1 a 20; G2: pruebas en las paredes inferiores del norte, incluye ensayos 21 a 28; G3: pruebas en las paredes inferiores del sur, incluye los ensayos 29 a 39; G4: prueba en la torre sur, incluye ensayos 39 a 43; G5: pruebas en la torre norte, incluye ensayos de 43 a 45; Y G6: pruebas en la pared superior, incluye ensayos de 45 a 48.

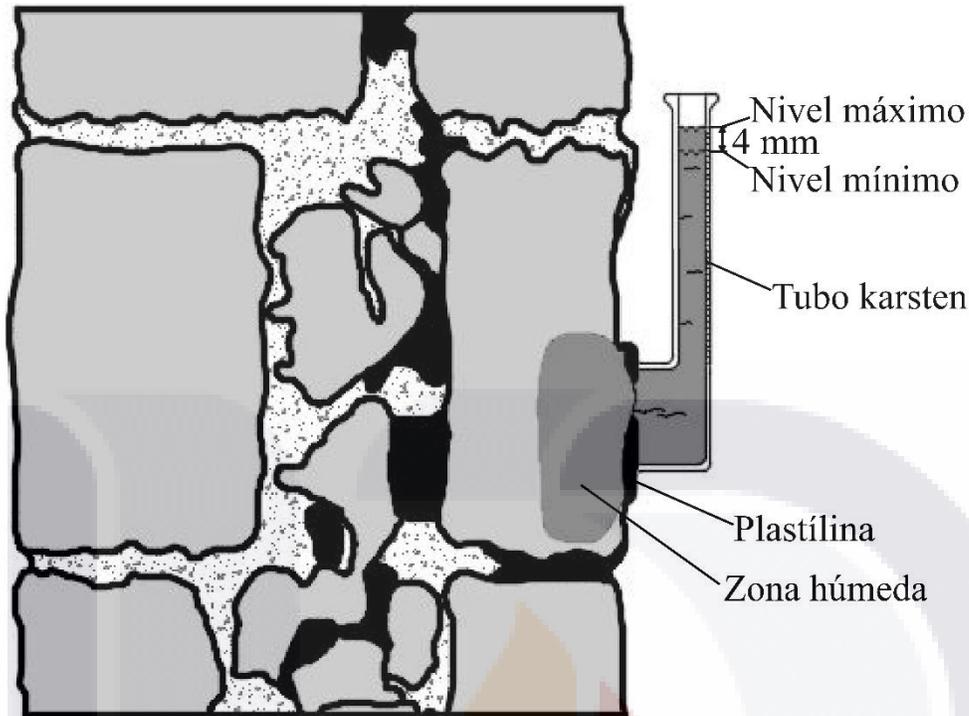


Figura 35. Ensayo de absorción realizado sobre las piedras de los muros de mampostería de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes. El procedimiento de campo para el ensayo incluyó: colocación del tubo de Karsten sobre la superficie de la roca, llenado de la pipeta con agua destilada, medición del nivel de agua a 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 y 30 minutos.

6.5 Pruebas de laboratorio

Debido a la imposibilidad de obtener muestras de todos los tipos de piedra para las pruebas del laboratorio del edificio histórico estudiado, las pruebas se limitaron a tipos específicos de piedra que fueron removidos del edificio durante una campaña de restauración. Se extrajeron muestras no desgastadas de estas piedras retiradas las piedras sustituidas, descartando las partes degradadas de la piedra para garantizar la obtención de muestras de piedra frescas para pruebas de laboratorio.

Todas las pruebas de laboratorio se realizaron en muestras cúbicas (6.5 cm x 6.5 cm x 6.5 cm) que fueron examinadas para identificar y etiquetar sus lados de acuerdo con la forma y el tamaño de su tejido expuesto (tabla 15). Las pruebas de caracterización hidráulica se aplicaron sobre las tres superficies identificadas por los ejes X, Y y Z de cada muestra cúbica para detectar la anisotropía hidráulica de la roca.

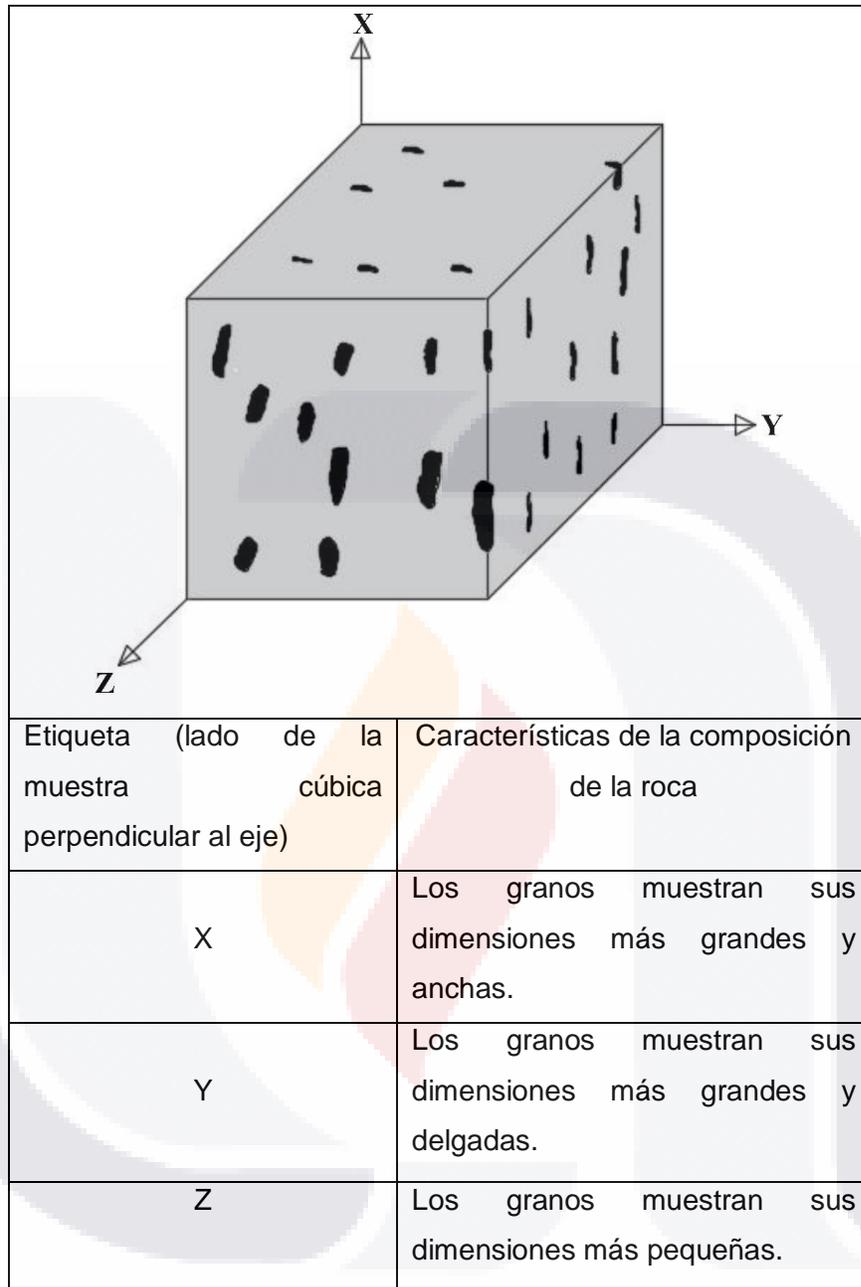


Tabla 15. Nomenclatura utilizada para las caras de la muestra cúbica

Aplicamos la misma metodología que las pruebas "in situ" (tubo de Karsten) para determinar la capacidad de absorción en condiciones de laboratorio en 3 piedras (S01, S04 y S05). Además, se realizaron ensayos de absorción de agua en 4 muestras (S01, S03, S04 y S05) según DIN ISO 15148.

Así mismo, se determinó la densidad de la matriz (ρ_{matrix}), densidad aparente (ρ_{Bulk}) y porosidad de la muestra mediante la prueba de peso hidrostático, de acuerdo con la especificación DIN EN 772-4 en 4 muestras de piedra (S02, S03, S04 y S05). S01 y S06 no estaban disponibles para esta prueba. Además, se probaron tres muestras de piedra (S01, S02 y S03) con el ensayo de intrusión de mercurio (DIN 66133) para determinar el tamaño de poro y la distribución de porosidad. Finalmente, se ensayaron 4 muestras cúbicas de piedra (S01, S03, S04 y S05) con el método de cristalización de sales (DIN EN 12370) para caracterizar la tasa de degradación de la roca. La tabla 16 resume las pruebas realizadas sobre muestras de piedra indicando el tipo de piedra y el número de muestras ensayadas. No fue posible probar los seis tipos de rocas en todas las pruebas debido a la dificultad de obtener un número suficiente de muestras para cada una de las pruebas.

Procedimiento de la prueba	Parámetro a determinar	Tipo de piedra	Muestras ensayadas
RILEM 25-PEM (IN SITU)	Capacidad de absorción	S02	11
		S04	12
		S05	11
		S06	7
RILEM 25-PEM (EN LABORATORIO)	Capacidad de absorción	S01	4
		S04	5
		S05	6
DIN ISO 15148	Capacidad de absorción (Water uptake)	S01	1
		S03	1
		S04	1
		S05	1
DIN EN 772-4	Densidad de la matriz, densidad aparente y porosidad de la muestra	S02	1
		S03	1
		S04	1
		S05	1
DIN 66133	Porosidad y distribución del tamaño de poro.	S01	1
		S02	1
		S03	1
DIN EN 12370	Tasa de degradación de la roca debido a la cristalización mediante sal	S01	1
		S03	1
		S04	1
		S05	1

Tabla 16. Campaña de pruebas de laboratorio realizadas en muestras de piedra

6.6 Resultados

6.6.1 Capacidad de absorción de agua in situ

26 pruebas "in situ" dieron resultados confiables. Las mediciones efectuadas en el primer metro de altura de la pared informaron valores de absorción extremadamente bajos, incluso se midieron varios valores nulos de absorción. Después de estos resultados iniciales anómalos, una inspección visual en los puntos donde se realizaron estas pruebas mostró que las piedras tienen una capa superficial impermeable. La formación de una capa de suciedad creada en la superficie de las piedras por la contaminación atmosférica o el crecimiento de agentes biológicos que inducen la degradación de la piedra ha sido reportada por varios autores (Bonazza et al., 2007a; Brimblecombe, 1999, 2000; Zappia et al., 1998; Turkington et al., 1997; Amoroso and Fassina., 1983; Del Monte et al., 1981).

La cubierta impermeable causó que los resultados de las pruebas de tubo de Karsten fueran valores de absorción más bajos que aquellos que se midieron en piedras que no la presentan. Esta capa superficial impermeable se desarrolló sólo en las piedras de las partes inferiores de las paredes. Se generó debido a la suciedad antropogénica (grasa, polvo y humedad) que se acumuló e impregnó con el tiempo en las piedras de la pared, llevando a la obstrucción de la continuidad de la porosidad de la piedra en una capa superficial, y consecuentemente genera una disminución en la permeabilidad de la piedra.

Otro factor, que podría estar contribuyendo a la formación de la cubierta impermeable, es la humedad ascendente. Esta humedad podría estar causando la cristalización de la sal y consecuentemente una obstrucción de los poros de piedra.

Después de esta observación, se realizaron pruebas en las piedras de más de dos metros de altura, donde las piedras están libres de esta suciedad.

En la figura 36 se muestran las gráficas de absorción vs tiempo para los 26 puntos ensayados en la catedral. Estas gráficas muestran datos sólo para S02, S04, S05 y S06, que fueron las piedras ensayadas sin la presencia de la cubierta impermeable (suciedad). A partir de las piedras ensayadas, la que tiene la tasa de absorción más alta es S05. Las pruebas en las piedras S01 y S03 produjeron valores no representativos de la absorción de la piedra (valores cercanos a cero), debido a la presencia de la capa superficial impermeable. Por lo tanto, estos gráficos se excluyeron de la figura 36.

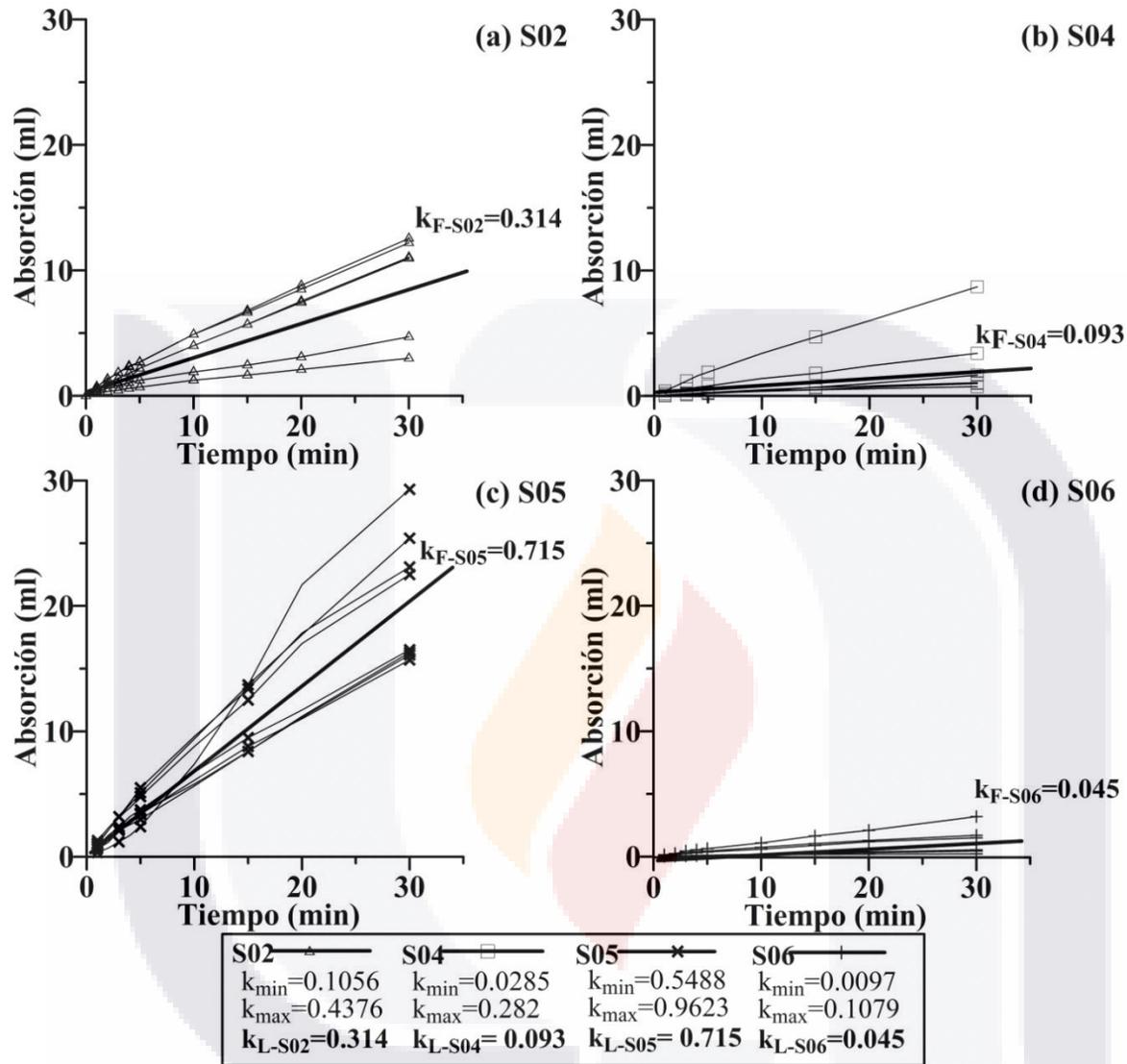


Figura 36. Prueba de capacidad de absorción de agua "in situ" para las muestras S02, S04, S05 Y S06. k_{min} , k_{max} y k_L (ml / min) son el coeficiente de absorción mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio.

6.6.2 Pruebas de laboratorio

La figura 37 muestra los gráficos de las tres piedras (S01, S04 y S05) probadas con el tubo de Karsten para determinar la velocidad de absorción o la velocidad de penetración del agua. Los gráficos muestran que la piedra con la tasa de absorción más alta es la S05, además, que las piedras muestran anisotropía hidráulica. Esto se demuestra ya que

en todos los gráficos, el lado X es el que tiene la tasa de absorción más alta, mientras que las tasas de absorción más bajas corresponden al lado Z.

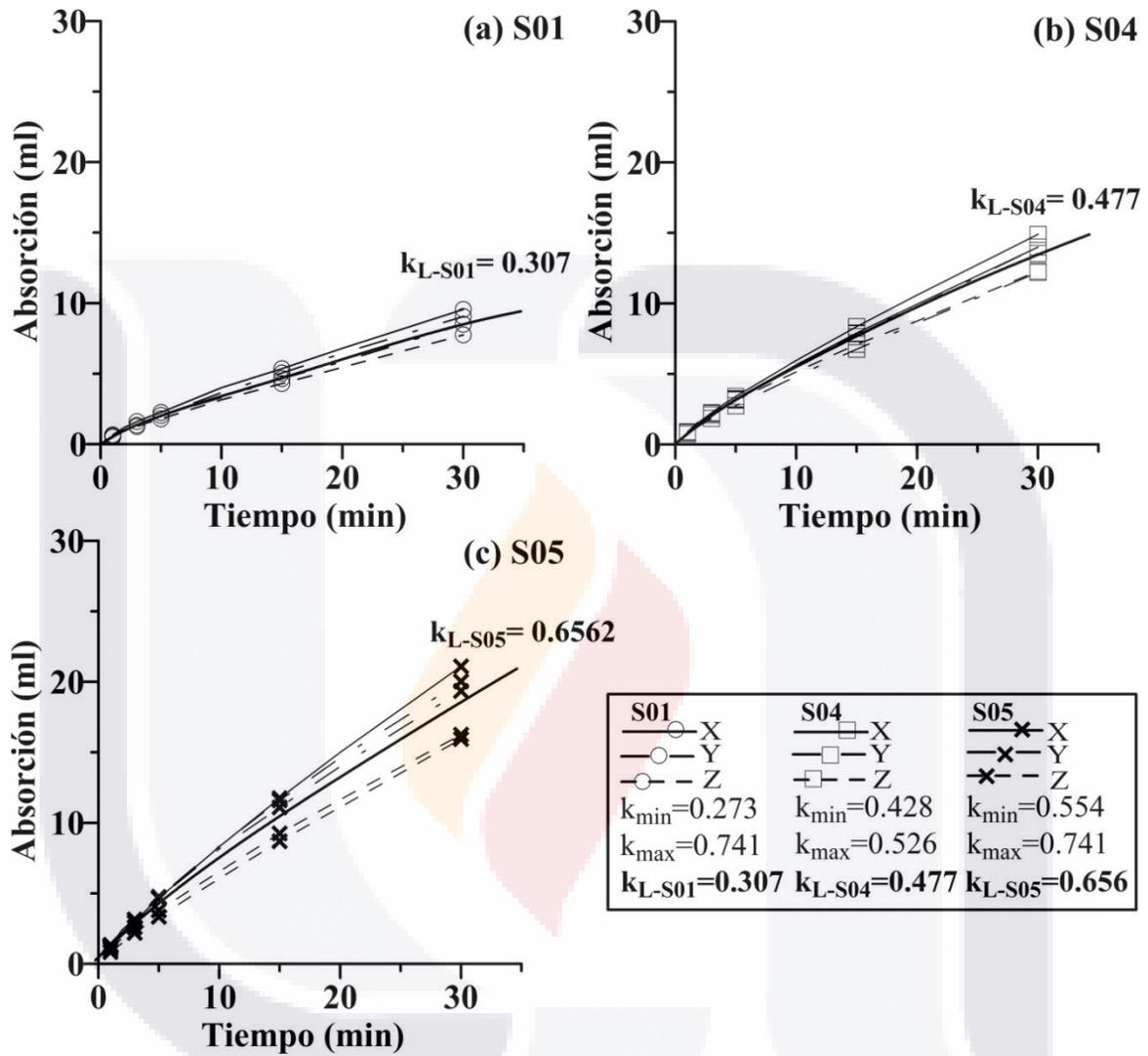


Figura 37. Capacidad de absorción de agua (Water absorption capacity) en la prueba de laboratorio para las muestras S01, S04 y S05. k_{min} , k_{max} y k_L (ml / min) son el coeficiente de absorción mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio.

La figura 38 muestra las gráficas de las muestras ensayadas con la prueba de absorción de agua (S01, S03, S04 y S05) según la norma DIN ISO 15148. Los gráficos muestran que la piedra S05 tiene la mayor capacidad de absorción de agua por capilaridad, lo cual es consistente con los resultados de las pruebas de absorción tanto in situ como en laboratorio (figuras 36 y 37).

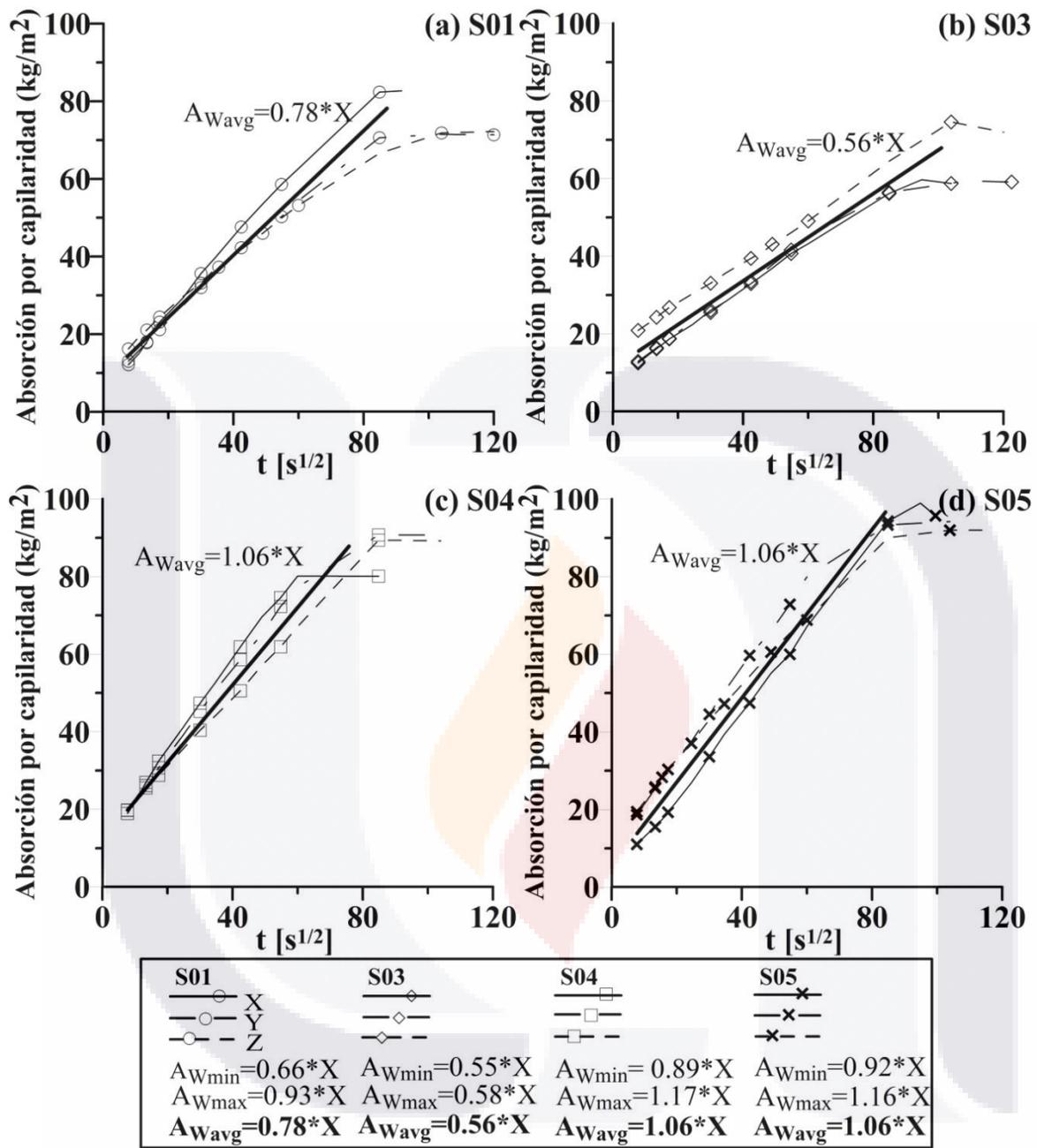


Figura 38. Captación de agua por capilaridad obtenida en las cuatro muestras: (a) S01, (b) S03, (c) S04 y (d) S05. A_{Wmin} , A_{Wmax} y A_{Wavg} son el coeficiente de absorción de agua mínimo, máximo y medio respectivamente determinado en el laboratorio. La línea gruesa es la línea de tendencia media en cada muestra.

La tabla 17 muestra los resultados de la prueba de peso hidrostático realizada en las piedras S02, S03, S04 y S05, y la figura 39 muestra la distribución del tamaño de poro para las piedras originales y reemplazadas S01, S02 y S03. La distribución de los radios de poro efectivo muestra claramente que la roca de construcción original es casi

exclusivamente macropórica, mientras que la roca de reemplazo (S02) tiene principalmente microporos. La roca utilizada en las últimas restauraciones (S03) tiene una distribución muy similar a la de la roca original.

Muestras	Porosidad [%]	Densidad aparente [g/cm ³]	Densidad de la matriz [g/cm ³]
S01	37.31	1.45	2.31
S02	31.88	1.63	2.39
S03	28.65	1.72	2.41
S04	33.32	1.63	2.44
S05	32.19	1.65	2.44

Tabla 17. La porosidad, la densidad aparente y la densidad de la matriz resultaron de la prueba de peso hidrostático.

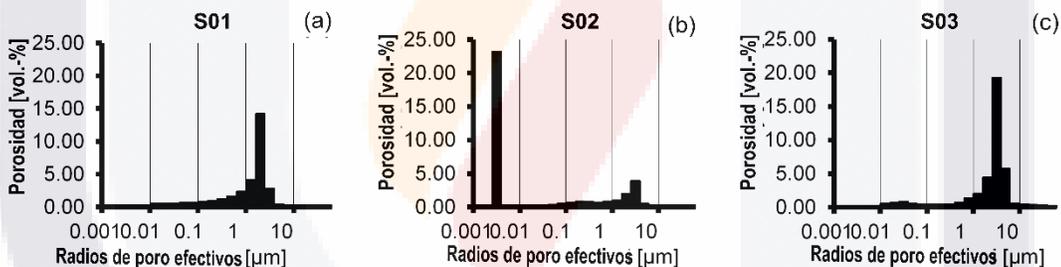


Figura 39. Distribución del tamaño de poro y porosidad total de las piedras. a) S01, b) S02 y c) S03.

Los resultados de la tabla 17 muestran que aunque la piedra S05 tiene el valor más alto de captación de agua capilar y la tasa más alta de absorción de agua (ver figuras 36, 37 y 38), la piedra S04 es la que tiene la mayor porosidad.

La figura 40 muestra los resultados de la prueba de cristalización de sal (prueba de ruptura mediante sal) para las piedras S01, S03, S04 y S05. Los gráficos muestran 4 etapas bien definidas a lo largo de la curva de degradación de la muestra que se discuten en la sección de discusión de resultados.

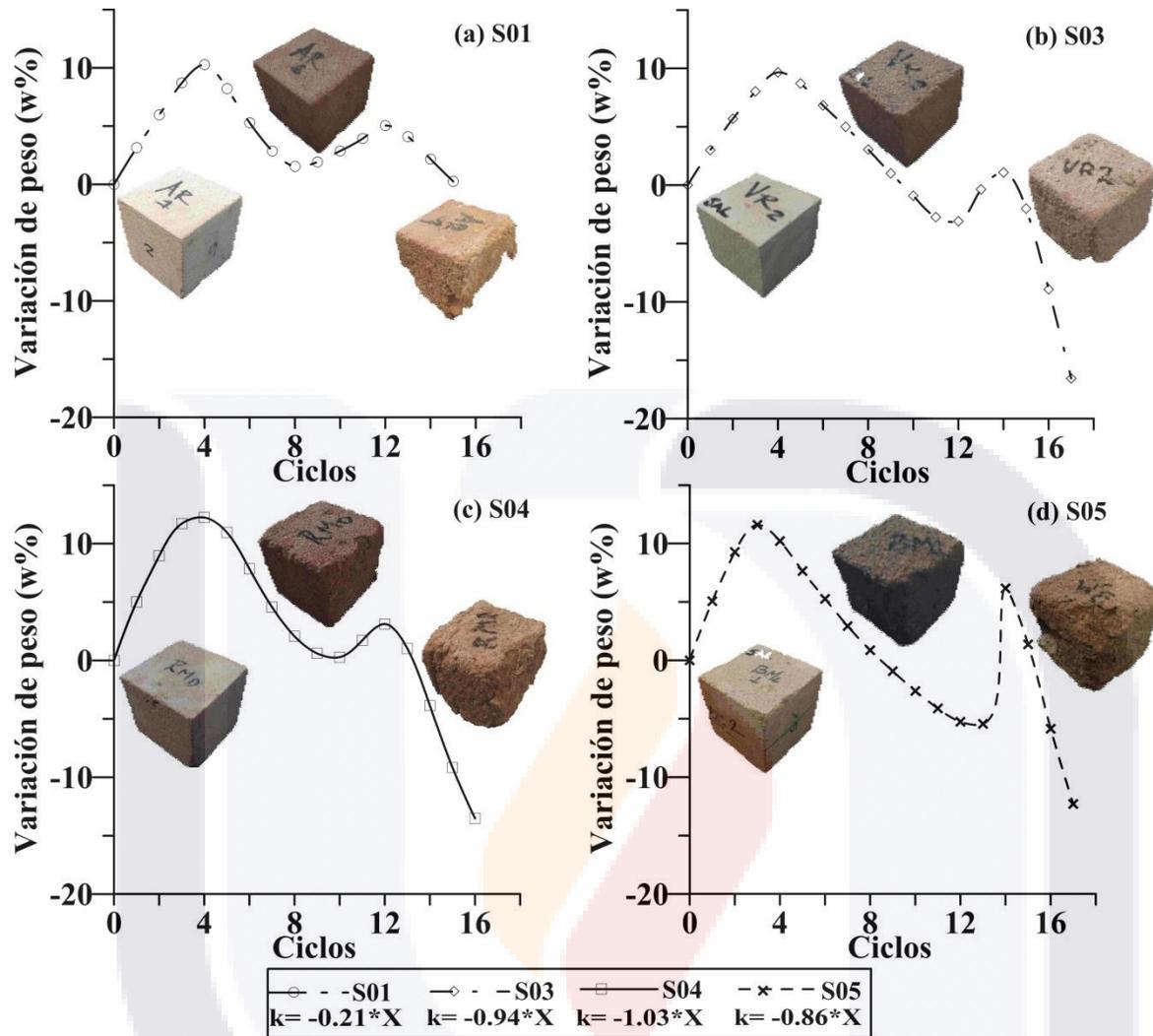


Figura 40. Gráficos de degradación de la piedra por cristalización de sal para las muestras S01, S03, S04 y S05.

6.7 Discusión

6.7.1 Pruebas de absorción de agua y tubo de Karsten

Los datos de absorción de las pruebas in situ utilizando el tubo Karsten son una medida de la velocidad de penetración del agua en la piedra, mientras que los datos de la prueba de absorción de agua (*water uptake*) caracterizan la capacidad de las piedras para captar el agua por capilaridad. Los valores altos de estos dos parámetros están relacionados con contenidos potencialmente mayores de agua en las piedras, y por lo tanto están relacionados con un alto potencial de cristalización de sal. De ahí que ambos parámetros se puedan utilizar como indicador de la propensión de una piedra a ser afectada por la

crystalización de la sal, que es el principal daño observado en las piedras de mampostería de la Catedral de la Ciudad de Aguascalientes.

En consecuencia, los resultados de las pruebas de absorción de agua y tubo de karsten muestran que la piedra S05 (toba de Valladolid) tiene una mayor propensión a la cristalización de sales. Esto es consistente con el nivel de daño observado en las piedras de la mampostería de las paredes estudiadas del edificio. Rock S06 informa de la tasa de absorción más baja en la prueba de tubo de karsten. Por lo tanto, esta roca tiene la menor propensión a la cristalización.

Aunque los resultados de las pruebas de campo presentan una alta dispersión, son consistentes con los resultados del laboratorio. Además, los resultados anómalos observados en las pruebas de campo realizadas en las partes inferiores de las paredes (valores de absorción bajos o nulos) se relacionaron con una película de cubierta de suciedad causada por actividades antropogénicas. Esta película de suciedad favorece la cristalización de las sales debido a que el agua absorbida del subsuelo no se puede secar a través de la superficie expuesta de las paredes del edificio. A partir de ahí, los resultados de las pruebas in situ que dan valores anormalmente bajos, podrían utilizarse como un indicador de la altura de la pared en la que el aumento de humedad podría estar favoreciendo y actuando como acelerador de la erosión por cristalización de sales.

El mayor número de pruebas con resultados anormalmente bajos se realizó en la pared del lado norte del edificio, sobre una calle con alto tránsito de autos y personas. Esto sugiere que esta pared podría ser la más deteriorada internamente debido a la cristalización de la sal, y demuestra que la combinación de tránsito de vehículos y personas que caminan cerca de un edificio histórico es un acelerador del deterioro de la mampostería.

Por otra parte, los bajos valores de ambos, coeficientes de absorción (k) y de absorción de agua (A_w), se asocian a piedras menos propensas a deteriorarse debido a su baja capacidad y velocidad para absorber agua. Por lo tanto, los resultados del laboratorio muestran que las piedras S01 y S03 tienen un mejor rendimiento contra la absorción de agua capilar. Es muy importante notar que ambas muestras (S01 y S03) tienen prácticamente sólo macroporos (figura 39) y que pueden favorecer en la circulación del agua en la roca, pero se ha notado que ambas muestras contienen una matriz vítrea

(textura vítrea) con una complicada red de poros que provoca una porosidad poco efectiva.

Por lo tanto, estos tipos de piedras podrían ser las más adecuadas para ser utilizadas en futuras restauraciones como material de sustitución.

Aunque las pruebas absorción de laboratorio muestran que las piedras tienen anisotropía hidráulica, si se considera que las variaciones de absorción para los diferentes lados de una muestra de piedra están en el mismo orden de magnitud (figura 37), entonces la anisotropía no es significativa para todas las piedras ensayadas.

6.7.2 Porosidad y distribución del tamaño de poro

Según varios autores (Siegesmund, 2014; Ruedrich et al., 2005b, 2010a; Viles et al., 1997; Poschlod, 1990; Fitzner and Snethlage, 1983; Fitzner, 1970; Hirschwald, 1912), la porosidad tiene un papel clave en el análisis de la erosión de la piedra debido a que la porosidad tiene una relación directa con otras propiedades físicas de la piedra. Lucia (1983, 1995, 1999) encontró que la alta porosidad se considera un factor negativo para el comportamiento de la piedra como material de construcción, y está relacionada con una menor resistencia a la compresión y una alta susceptibilidad al desgaste.

A pesar de que los resultados de la prueba de peso hidrostático indican que la piedra S04 (de Valladolid) es la de mayor porosidad efectiva, las determinaciones en laboratorio muestran que ésta presenta valores de tasa de absorción y coeficiente de absorción de agua muy próximos a los de la piedra S05 (figuras 37 y 38). Por lo tanto, estos resultados sugieren que la piedra S04 es también una piedra propensa a captar el agua por capilaridad y consecuentemente también más propensa a ser deteriorada por la cristalización de la sal como la piedra S05. Además, los resultados del peso hidrostático muestran que la piedra S03 tiene una menor porosidad (tabla 16), lo cual es consistente con los resultados de las pruebas de absorción de agua y la tasa de absorción.

Los altos valores de absorción son comunes en las piedras toba debido a la baja compactación durante el proceso de deposición piroclástica, y están relacionados con bajos valores de densidad aparente y alta porosidad efectiva (Mosch y Siegesmund, 2007; y Mosh, 2009). Además, el mecanismo de absorción de agua capilar esta en función del tamaño de poro y sus interconexiones (porosidad efectiva). La absorción por capilaridad

se produce principalmente en materiales que tienen poros de 10 a 100 μm (poros capilares, véase Siegesmund, 2014).

La porosidad se puede clasificar según el tamaño de poro (Siegesmund y Dürrast, 2011): microporosidad (poros menores de 0.1 μm); Poro capilar (tamaño de poro de 1 μm a 1 mm) y macroporosidad (poros mayores de 1 mm). Los resultados mostraron que las piedras S01 y S03 tienen poro capilar, mientras que la piedra S02 presentó casi sólo microporosidad (figura 39).

6.7.3 Cristalización de sal

Los daños causados por el crecimiento de la sal en piedras porosas del patrimonio edificado son una preocupación importante para los estudios de restauración (Flatt, 2014, Tsui, 2003, Goudie y Viles, 1997).

Los resultados de las pruebas de cristalización de sal muestran que todas los especímenes presentaron cuatro etapas (figura 40). La etapa 1 tiene un incremento de peso debido a la formación de sales (cristalización) en la red de poros primaria, mientras que la etapa 2 presenta una disminución de peso causada por la pérdida de fragmentos y la separación parcial de la muestra debido a la pérdida de cohesión causada por la presión de los poros. La etapa 2 se acompaña de un evidente aumento en el color de las muestras que se vuelven más oscuras. Se puede observar una etapa 3. Es como una recuperación en la curva que corresponde a un aumento del peso, igualmente causado por la cristalización de la sal, pero esta vez debido a un aumento de la cristalización de la sal en la porosidad primaria y secundaria. Después de la fase 3, los especímenes revelan otro cambio en la coloración, cada vez más rojiza (figura 40). Después de esta etapa de recuperación, el gráfico muestra que el peso de la muestra cae hasta alcanzar su desintegración total (etapa 4).

Un comportamiento similar fue reportado por Flatt (2014) para la caliza Portland. Angeli et al. (2007) probaron areniscas y calizas, y sus resultados presentan un continuo decaimiento del peso medido en cada ciclo, mas no reportan una etapa de aumento como la observada en las muestras ensayadas en este trabajo. Sin embargo, el total de los ciclos de ruptura de sal realizados con las muestras estudiadas antes de su decadencia

total corresponde perfectamente con el comportamiento de otras rocas volcánicas analizadas (López-Doncel et al., 2016).

Todas las piedras ensayadas en este trabajo se desintegran aproximadamente en el 16º ciclo de las pruebas (figura 39). Esto significa que, a pesar de las diferencias mostradas en los otros parámetros determinados (velocidad de absorción, capacidad de absorción de agua y porosidad), las piedras ensayadas tienen una resistencia similar a deteriorarse por cristalización de sal.

6.8 Conclusiones

La humedad ascendente observada que afecta las paredes de la catedral se pueden explicar con los resultados de la caracterización de las piedras de los muros de mampostería: seis tipos de piedra fueron identificados como material constitutivo de las paredes. Todos ellos se clasificaron como tobas de alta porosidad con índices de porosidad del 28 al 37% y con coeficientes de absorción de agua entre 0.56 y 1.06 $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ para muestras libres de deterioro.

Entre las seis piedras identificadas, las denominadas S04 y S05 presentaron el mayor valor tanto en el coeficiente de absorción de agua como en la capacidad de absorción. Por lo tanto, estas piedras son las más susceptibles de obtener la humedad del subsuelo en forma más rápida y en mayores cantidades. Además, estas piedras tienen los valores más altos de porosidad. Por lo tanto, las piedras S04 y S05 son las más propensas a deteriorarse, lo que se confirmó a través del estudio de identificación de daños al mostrar que las patologías *flaking*, *scaling and black crusts* fueron más recurrentes en la piedra S04.

La prueba de cristalización de sal demostró que todas las piedras que tienen la misma resistencia se deterioran por este efecto (aproximadamente 15-17 ciclos) y esto depende totalmente de altos valores de porosidad de las muestras estudiadas (todas con porosidad > 25%). Sin embargo, las piedras presentan diferentes tasas de deterioro, siendo las piedras S03 y S04 las que se deterioran más rápidamente, y la piedra S01 la que tiene la menor tasa de deterioro. Por lo tanto, la piedra original S01 es la más apropiada para ser utilizada en futuras restauraciones en las que se requiere la sustitución de piezas de piedra.

Los resultados muestran que la altura de la posición de la piedra en la pared y la ubicación de las paredes en el contexto del entorno urbano, más que sus propiedades petrofísicas, es el factor determinante para el nivel de vulnerabilidad al deterioro de cada piedra. Las piedras situadas en la parte inferior de las paredes, cerca de la superficie del terreno, son más propensas a deteriorarse debido a que el efecto de humedad ascendente acelera el proceso de formación de daños. La pared norte de la catedral ubicada en una calle muy transitada tiene el índice de deterioro más acelerado de toda la catedral debido a los efectos combinados de la humedad creciente y la contaminación antrópica causada por el paso de vehículos y peatones.

Además de las conclusiones anteriores que tienen un valor pragmático para las obras de preservación de la catedral de la ciudad de Aguascalientes, la metodología aplicada podría ser utilizada para determinar la vulnerabilidad al deterioro de las piedras que forman parte de edificios, monumentos y esculturas. Un resultado importante, obtenido en la prueba de ruptura mediante sal, es el marcado cambio en la coloración de las rocas estudiadas (figura 40). Se reconoce claramente que, independientemente del color original de las rocas, todas las muestras adquieren una coloración más oscura durante la segunda fase del experimento, obteniendo en esta fase su tono más oscuro y continuando, casi de forma inmediata, con un cambio de tonos rojizos en las fases anteriores a la degradación total. Esta información servirá como una herramienta eficaz para reconocer el nivel de deterioro que provoca la cristalización de sales en tobas de edificios históricos.



CAPÍTULO 7

**DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN INTERNA DE
ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE EL MÉTODO
NO DESTRUCTIVO DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD
ELÉCTRICA.**

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO 7. DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN INTERNA DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE EL MÉTODO NO DESTRUCTIVO DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

7.1 Introducción

La mampostería de piedra es un material estructural complejo construido mediante la unión de piedra con el mortero o conexiones en seco conocidas como juntas. Es un compuesto heterogéneo, en la mayoría de los casos de geometría irregular y con una amplia variación en las propiedades mecánicas (Almeida, 2014). Su uso se remonta a los orígenes de la humanidad, utilizado ampliamente en la construcción de monumentos y edificaciones hasta el siglo XIX al ser desplazado por el concreto. El comportamiento mecánico, la durabilidad y la geometría de este tipo de elementos compuestos dependen del tipo de material, de la calidad de la mano de obra y del sistema constructivo empleado, así como de los factores de exposición tales como los fenómenos naturales y la intemperización. El análisis de la mampostería requiere de un amplio conocimiento de los sistemas constructivos utilizados, la geometría externa e interna, así como las propiedades mecánicas y las condiciones del suelo que lo soporta (Almeida, 2014; Borri, 2004; Kržan, 2014).

La documentación histórica de las construcciones de mampostería es fundamental ya que aporta datos como: las diferentes etapas de construcción, el tipo de material utilizado, la geometría inicial y las modificaciones a lo largo del tiempo; Sin embargo, hay pocos edificios antiguos con tales registros. Además de los datos históricos, hay varias formas de caracterizar la mampostería, las pruebas invasivas son una de ellas. La extracción de corazones es una de las pruebas invasivas más empleadas debido a la confiabilidad de los resultados, sin embargo, su uso es limitado debido que atenta contra las propiedades mecánicas y estéticas de la construcción. Existen también varias tablas y ecuaciones propuestas en el Código de Construcción Italiana o en el Euro código que aportan datos de sistemas constructivos más comunes en muros de mampostería en conjunto con factores según las condiciones de los muros. Además, se encuentran las Pruebas no Destructivos (NDT, por sus siglas en ingles), aplicadas en la investigación arqueológica desde de 1950, obteniendo parámetros físicos de los materiales geológicos. Investigaciones realizadas en los últimos años mediante el empleo de NDT en el patrimonio edificado (Balducci, M., Bartocci, F., Regni, R., & Santarato, G., 2010; Sass, O., & Viles, H. A., 2010; Cardarelli, E., & Di Filippo, G., 2009; Abu-Zeid, N., Botteon, D.,

Cocco, G., & Santarato, G., 2006; Leucci, G., Cataldo, R., & De Nunzio, G., 2007), obtuvieron resultados interesantes que contribuyen en el análisis del deterioro de los elementos de las estructuras históricas. Numerosas investigaciones (Guadagnuolo et al., 2014; Perez-Gracia et al., 2013; Lombillo et al., 2013; Rivero et al., 2013; Bosiljkov et al., 2010) mencionan que es necesario la aplicación de varios métodos para la definición de los parámetros físicos y mecánicos necesarios de los diferentes tipos de mampostería. La complejidad del análisis se encuentra en el proceso comparativo de las diversas pruebas utilizadas y la implementación o repetición de las pruebas en las diferentes áreas del edificio con el objetivo de conocer con mayor aproximación real del elemento estudiado.

Las NDT más comúnmente utilizadas son el GPR, el método sísmico, el ultrasónico y la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, por sus siglas en ingles). El método GPR se destaca como uno de los métodos de mayor uso en el estudio de edificios históricos debido a la practicidad y rapidez en la obtención de resultados, sin embargo, su uso se recomienda para superficies planas. Con el empleo del GPR en construcciones del tipo religioso, se obtuvieron resultados con fuertes dispersiones, así como profundidades de penetración limitadas debido a la existencia de arcilla sobre estructuras (Tsokas et al., 2008).

En la última década, la ERT ha generado altas expectativas con resultados importantes y modelos con buena resolución, útiles en la toma de decisiones en la conservación de monumentos. Uno de los principales factores que favorece la aplicación del método es la humedad contenida en las estructuras de mampostería debido a la porosidad de la roca, lo que provoca una disminución de los altos valores de resistividad y una adecuada transmisión de corriente. Los trabajos muestran interesantes avances en la determinación de la influencia de la humedad en los muros de mampostería y el conocimiento de la geometría interna de los elementos. Flint et al. (1999) hizo una comparativa de métodos no invasivos para determinar el método más idóneo en la obtención de propiedades de los materiales en el viaducto Rebberhead sobre uno de los pilares intermedios. En general las imágenes obtenidas por el método eléctrico comparadas con el método de radar y el sónico, muestran una mejor resolución para la determinación con mayor precisión de la geometría y anomalías internas.

Se menciona el caso de Abu, N., Balducci, M., Bartocci, F., Regni, R., & Santarato, G. (2010), que desarrollaron mediciones de resistividad en cuatro áreas de las paredes de la

iglesia medieval en la aldea de Montepetriolo en el Barrio de la Universidad de Perugia Italia, para determinar la distribución del mortero inyectado mediante imágenes 3D obtenidas. Concluye que es deficiente la estimación cualitativa de los volúmenes de huecos o grietas con mortero. En este trabajo se destaca el empleo de clavos insertados en la superficie de los muros y el uso del georesistivímetro que controla 48 electrodos. En el caso de Leucci, G., Cataldo, R., & De Nunzio, G. (2007), evaluaron las fracturas internas de la cripta de la catedral de Otranto en Apulia, Italia, mediante varios métodos no invasivos. Se obtiene que la ERT en 2D coincide con los resultados de GPR, sin embargo este último método muestra una mejor resolución de la imagen. Sass, O., & Viles, H. A. (2010), se enfoca en investigar la distribución de la humedad y el control del agua en muros de mampostería haciendo uso la ERT 2D en antiguas paredes en el centro de Oxford, Reino Unido. Se realizaron simulaciones de lluvia por medio de aspersores en diferentes tipos de materiales y la cantidad de aplicada. El autor concluye que el método es adecuado para revisar la penetración del agua en la mampostería histórica. Abu-Zeid, N., Botteon, D., Cocco, G., & Santarato, G. (2006) realizaron estudios sobre cimentaciones antiguas en Venecia, Italia, con el objetivo de evaluar la restauración de los muros después de trabajos de consolidación. Se obtuvieron mediciones en 2D y 3D que se concluye que la prueba ERT demostró tener la capacidad de mapear volúmenes después de la consolidación del mortero. Al final, el autor recomienda el método ERT por encima de los otros métodos, en el caso que se cumplan condiciones de entornos de baja resistividad y una accesibilidad a la cara posterior de la pared investigada.

Los resultados de las diversas investigaciones han generado importantes avances aunque sin obtener modelos con buena resolución que aporten en el conocimiento a detalle la geometría interna de los elementos, es decir, características como: número de hojas que integran la sección, conectividad entre hojas y oquedades entre materiales, además del deterioro generado por la humedad.

La adaptación del método de resistividad eléctrica al patrimonio edificado ha implicado una serie de retos importantes como son:

- La colocación de electrodos sin provocar daños en las superficies de medición. La medición de elementos verticales implica una adecuada sujeción y aplicación de presión para una efectiva transmisión de corriente eléctrica.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Los altos valores de resistividad de la mampostería y el amplio rango de resistividad obtenido de las rocas, el cual varía según el tipo de roca, el deterioro, las condiciones de humedad y el adecuado contacto con la superficie de los elementos.
 - El proceso de calibración de la prueba para la definición parámetros, la correlación de valores de resistividad con los tipos de materiales, así como lograr el dominio de la prueba.
 - La exigencia de una mejor resolución de los modelos ya que las escalas se reducen a centímetros o un par de metros.
 - El problema de heterogeneidad y la cantidad de pruebas necesarias para hacer una evaluación confiable.

Existen otros factores que pueden influir en la obtención de modelos geométricos como son: las características del equipo empleado, los arreglos en las mediciones, el nivel de análisis y la experiencia en la interpretación de los resultados.

Con respecto a los diferentes arreglos en el método ERT, los más utilizados son Wenner, Wenner–Slumberger y Dipolo-dipolo. Cada uno de las configuraciones tiene sus ventajas y desventajas tanto en la ejecución de las mediciones como en obtención de los resultados. El método Wenner, la principal característica es que es posible detectar elementos horizontales con buena resolución, Wenner-Slumberger se recomienda su uso para estructurales horizontales delgadas y en estructuras verticales de mayor dimensión. El arreglo Dipolo-dipolo es ampliamente usado para detectar con buena calidad estructuras verticales, sin embargo, no es recomendable para la detección de estructurales con acomodo horizontal. Este último arreglo es el mayormente empleado en los trabajos realizados tanto en la geofísica como en el campo del patrimonio edificado. Según Weinzettel et al. (2009) la combinación arreglo-espaciamiento muestra diferentes detalles en la observación del perfil que pueden ser más o menos relevante de acuerdo al objetivo de estudio y a las particularidades que intentan definirse.

Para la interpretación de modelos o perfiles de ERT, existen rangos de resistividad para diferentes tipos de materiales a analizar. En la figura 41 se muestran los rangos de variación más comunes en algunas rocas y minerales.

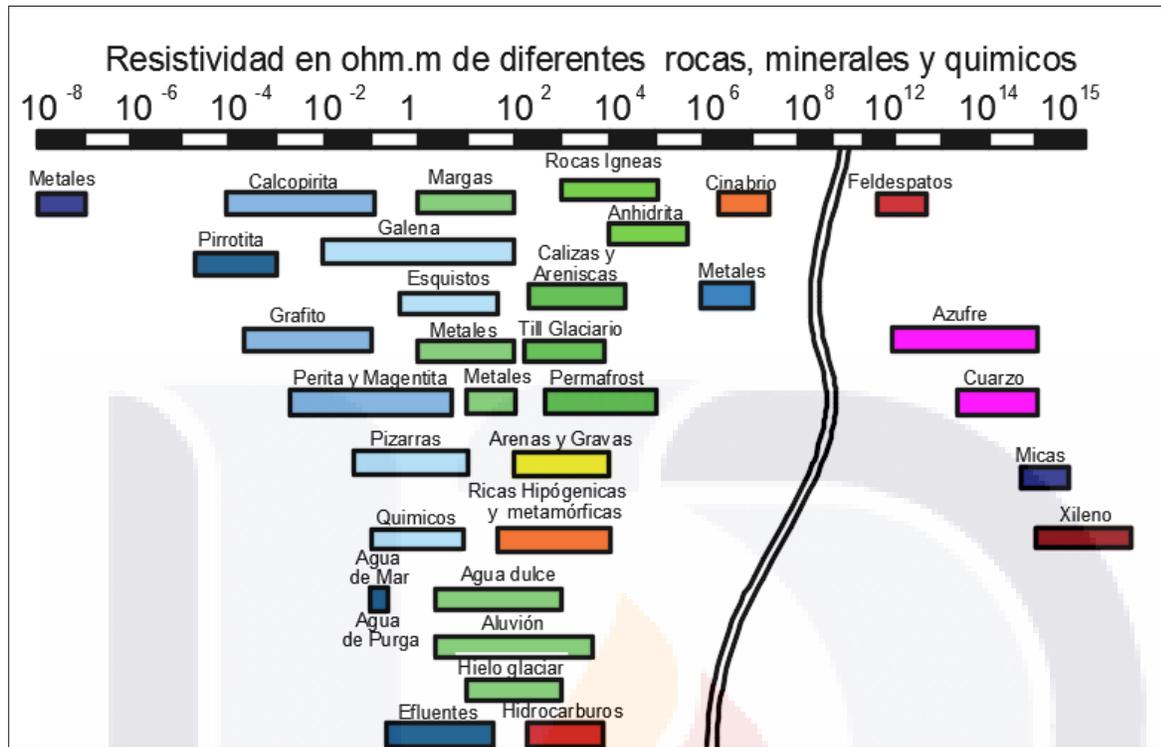


Figura 41. Gráfica de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982).

El rango de valores de interés se reduce de 10^2 a $10^5 \Omega m$, ya que la roca de mayor uso en mampostería es de tipo ígnea. A partir de los estudios realizados mediante el uso de ERT, se han establecido valores de resistividad para varios materiales.

Según Abu-Zeid (2006) la resistividad del ladrillo saturado en agua salada presenta valores entre 20 y 70 Ωm , el lodo con sales presenta valores cercanos a 1 Ωm , la resistividad del mortero dos semanas después de colocarlo resultó de 100 Ωm , el mortero saturado con agua salada es de 20 Ωm . Cardarelli y De Nardis (1999); una pared seca puede asumir valores en el rango de 3×10^3 y $5 \times 10^4 \Omega m$ (Nasser et al., 2009; Santarato y Vaccaro, 2001; Santarato et al, 1999) obtienen que los valores de resistividad en una pared seca oscilan entre el 3×10^3 y $5 \times 10^4 \Omega m$. En resumen, los valores de resistividad en el patrimonio edificado pueden variar de 10^2 a $3 \times 10^6 \Omega m$. La presencia de humedad y sales disueltas genera bajos valores de resistividad, así como los altos valores son causados por la existencia de fracturas, huecos y fallas en las conexiones de los materiales.

Este trabajo tiene por objeto demostrar la factibilidad de la adaptación del método de resistividad eléctrica en elementos de mampostería de piedra de edificios históricos. Así mismo, determinar con mayor precisión características geométricas internas como: las interfaces entre los materiales, el número de hojas que integra la sección y las anomalías internas. Además, se busca contribuir y ampliar en el conocimiento de los muros de la catedral de Aguascalientes y aportar datos de mayor precisión para en el campo de la modelación mediante elementos finitos.

7.2 Materiales y métodos

La implementación de la ERT se hizo en dos muros de mampostería de piedra con tres aspectos diferentes: sistema constructivo, función y espesor. El muro 1 es un muro de contención ubicado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (figura 42A), es un muro bajo de sección conocida; el muro 2 es parte de la fachada principal de la catedral de Aguascalientes, en este caso se desconoce la sección (figura 42B). Ambos muros se describen a continuación:

Muro 1. Muro de contención de 0.40 m de espesor en la parte de superior y 1.3 m de altura, conformado con aparejo irregular de mampostería de piedra ordinaria con textura lisa y juntas de mortero cemento-arena de 0.02 m de espesor promedio, las dimensiones de las piezas es variable en un rango de 0.30 a 0.40 m por lado. La sección se integra de dos hojas interconectadas y relleno central de mortero. Se compone de cantera blanca de dureza media-baja, presenta deterioro por humedad e intemperización, principalmente en el extremo izquierdo y en la parte posterior al muro (figura 42A).

Muro 2. Muro de la fachada principal de la catedral de Aguascalientes de 1.4 m de espesor promedio, altura aprox. de 14 m, compuesto por sillar de piedra toba con esquinas redondeadas y juntas de mortero cal-arena uniformes de 0.02 m espesor promedio. Según el espesor del muro y la dimensión de los sillares, el muro podría estar compuesto por dos hojas externas y varias hojas internas conectadas. Se integra de cantera rosa de mediana porosidad (30% de porosidad promedio) y dureza. Presenta problemas de humedad por capilaridad en el primer metro y medio de altura, aunado al efecto de intemperización es notable el deterioro y el cambio de tono en varias de las piezas (figura 42B).

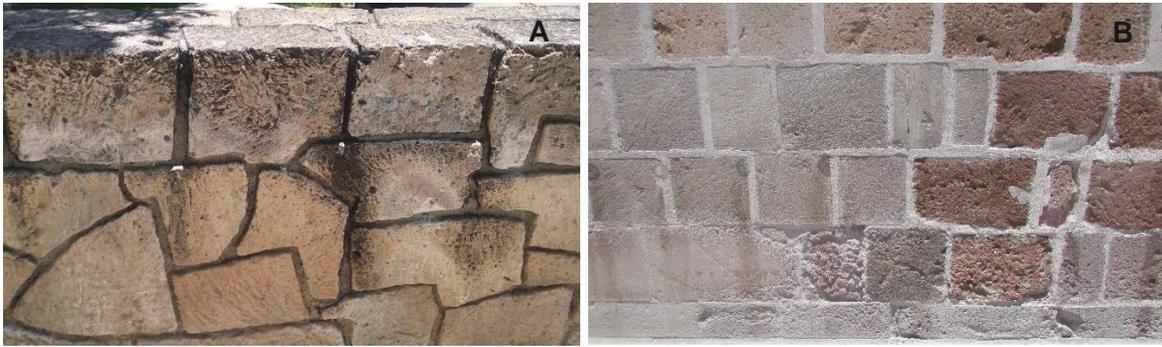


Figura 42. Muros de mampostería estudiados. (A) muro 1, (B) muro 2.

Las pruebas se llevaron a cabo utilizando un resistivímetro Iris Instruments SYSCAL junior SWITCH 24, con una fuente de alimentación que mediante un par de electrodos inyectan corriente continua o de baja frecuencia en muros y otro par de electrodos que miden la diferencia de potencial al interior del elemento.

El proceso de adaptación del método se realizó considerando los siguientes aspectos: reducción de la escala de las mediciones, amplia variación de las resistividades, la irregularidad las superficies, la alta heterogeneidad y la verticalidad de los elementos de medición; además, la manipulación de los electrodos durante la inyección de corriente. Con base en estos aspectos, se diseñaron 24 electrodos de CPVC de $\frac{1}{2}$ ", 23 cm de largo con un extremo plano de cobre y al otro extremo conectado al cable conductor proveniente de la fuente. Además, se diseñó y construyó un sistema de colocación, fijación y presión para los nuevos electrodos utilizando elementos de acero (PTR de 2", canal de 4" y varilla lisa de $\frac{1}{2}$ ") con la objetivo de llevar a cabo mediciones de forma automática. El sistema consiste en módulos de 2 m de largo y 2 m de alto, con una base de acero para la colocación de electrodos que permite desplazamientos en sentido vertical para hacer mediciones a diferentes alturas del muro. En este trabajo se empleó un solo módulo para realizar las mediciones automáticas, sin embargo, se realizaron mediciones manuales con mayor alcance.

Posteriormente, se llevaron a cabo varias mediciones de prueba y calibración en elementos de mampostería. Inicialmente, surgieron problemas debido a las altas resistividades obtenidas, las cuales se resolvieron con la adaptación de una esponja de carbono húmeda, disminuyendo así la resistencia a valores aceptables.

Después de comprobar el adecuado funcionamiento del sistema y electrodos, se procedió a realizar mediciones automáticas y manuales en los muros 1 y 2, empleando la

configuración dipolo-dipolo. Las mediciones se hicieron a diferentes alturas del muro debido a los niveles de deterioro de la superficie y a la humedad ascendente presente en las partes bajas de los muros. Además, se realizaron cambios en la separación entre electrodos sobre la misma línea de medición con el objetivo de obtener y contrastar modelos con diferentes profundidades de exploración y de resolución.

En el muro 1 se realizaron cuatro pruebas de ERT (figura 43), dos por cada lado mediante el arreglo dipolo-dipolo en forma manual y automática. En la medición automática se empleó el sistema para la colocación de 24 electrodos separados a cada 0.05 m con 1.15 m de longitud y una profundidad de 0.20 m para la obtención de datos. Después de instalar el equipo y antes de iniciar cada medición, se colocaban las esponjas de carbono, posteriormente se agregaba gel conductor en las esponjas para mejorar la efectividad en la inyección de corriente.



Figura 43. Prueba automática ERT en muro 1 mediante el sistema de acero para la colocación y fijación de electrodos.

La medición manual se hizo sobre la misma línea de la medición automática mediante 4 electrodos sujetos por personas y desplazados según la distribución del arreglo dipolo-dipolo, con una separación de 0.10 m y una longitud de 2.2 m, una profundidad de sondeo de 0.40 m.

La primera y segunda medición sobre el muro 2 se hicieron en modo automático al costado derecho de la fachada, ambas con el mismo acomodo empleado en la medición del muro 1, a una altura de 0.80 y 1.60 m del piso respectivamente. La medición 3 también se realizó de forma automática a 0.80 m en el costado izquierdo de la fachada; las mediciones 4 y 5 en forma manual con separación de electrodos a 0.20 y 0.30 m, y longitudes de 4.60 y 6.40 m respectivamente. Las mediciones 4 y 5 se ubicaron 0.20 m arriba de la medición 3 con un punto medio en común, con la finalidad de obtener diferentes profundidades y niveles de resolución sobre una misma línea. Adicional a las mediciones, se obtuvieron datos físicos y geométricos de las superficies mediante observaciones “in situ”.

En el procesamiento se empleó la Técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) (Seidel and Lange, 2007) utilizando el arreglo Dipolo-dipolo con un equipo SYSCAL de 24 electrodos. Tomografías de Resistividad Eléctrica se invirtieron de acuerdo con deGroot-Hedlin and Constable (1990) para lograr los modelos electro-estratigráficos mostrados en las figuras 44, 46, 47, 48, 49 y 50

7.3 Resultados

7.3.1 Mediciones de ERT en el muro 1

Se realizó una prueba manual y una prueba automática por cada lado del muro 1. Todas las mediciones automáticas se hicieron con una separación de electrodos de 0.05 m, una longitud de medición de 1.15 m y una profundidad de 0.20 m. En mediciones manuales, en el caso del muro 1 se empleó una separación de electrodos de 0.10 m, 2.30 m de longitud de medición y 0.40 m de profundidad, logrando obtener la sección completa. Los modelos obtenidos fueron interpretados por medio de la escala de resistividad y complementados con la sección de muro (figura 44b) para definir la configuración interna del muro. Las zonas identificadas son dos: piedra (resistividad de 6 a 200 Ωm) y mortero, fragmentos de roca y vacíos (rango de 200 a 2000 Ωm) (figura 44a), estas zonas se subdividen de acuerdo a las variaciones de tonos lo que podría significar cambios en el aumento de porosidad, variación en el contenido de humedad, vacíos en las interfaces de los materiales o un cambio en la composición del material. En la figura 44 se muestra el modelo obtenido de la unión de las mediciones automáticas por ambos, así como la

sección del muro elaborada a partir de fotografías de las paredes, es por eso que se desconoce la estructura interna.

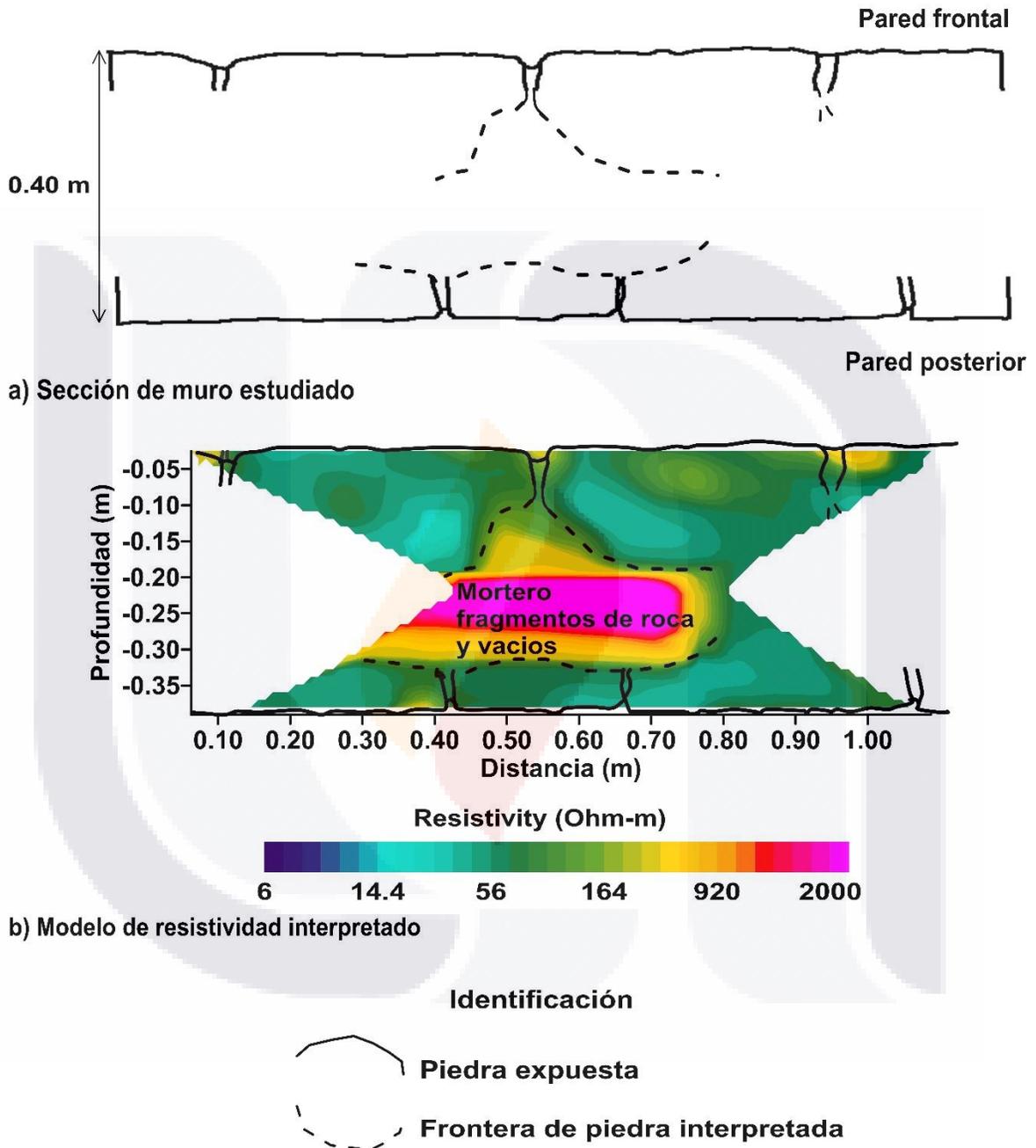


Figura 44. Modelo de la sección del muro 1, resultado de las mediciones automáticas por ambos lados y unidos por interpolación lineal. a) Sección de muro estudiado vista de planta basada en las imágenes de las paredes para la proyección de las juntas con una estructura interna sin definir. b) Modelo de resistividad interpretado mediante el trazado de fronteras de piedra y proyección de juntas.

Durante la colocación del equipo sobre el muro fue necesario revisar el adecuado contacto de los electrodos sobre la superficie, ya que un deficiente contacto podría generar altos valores de resistividad, así como la suspensión intermitente de la medición. La línea de medición se ubicó en la parte superior del muro a una misma altura por ambos lados, sobre la primera fila en el lado frontal y en la segunda fila en el lado posterior; con el propósito de comparar el modelo obtenido con la sección expuesta del muro.

Las siguiente figura 45a muestra la seccion del muro 1 vista de planta, asi como en la figura 45b se observa el relleno central del muro al desprenderse uno de los elementos.



Figura 45. Sección del muro 1. (A) Imagen de planta, (B) composición interna del muro.

En la medición manual con electrodos a cada 0.1 m, se tomó de referencia el centro de la medición automática para extenderse hacia ambos lados de forma simétrica. La longitud de la medición es de 2.30 m y 0.40 m de profundidad. Este tipo de pruebas se hicieron con el fin obtener el modelo de la sección completa y contrastar ambos modelos (figura 44 y 46).

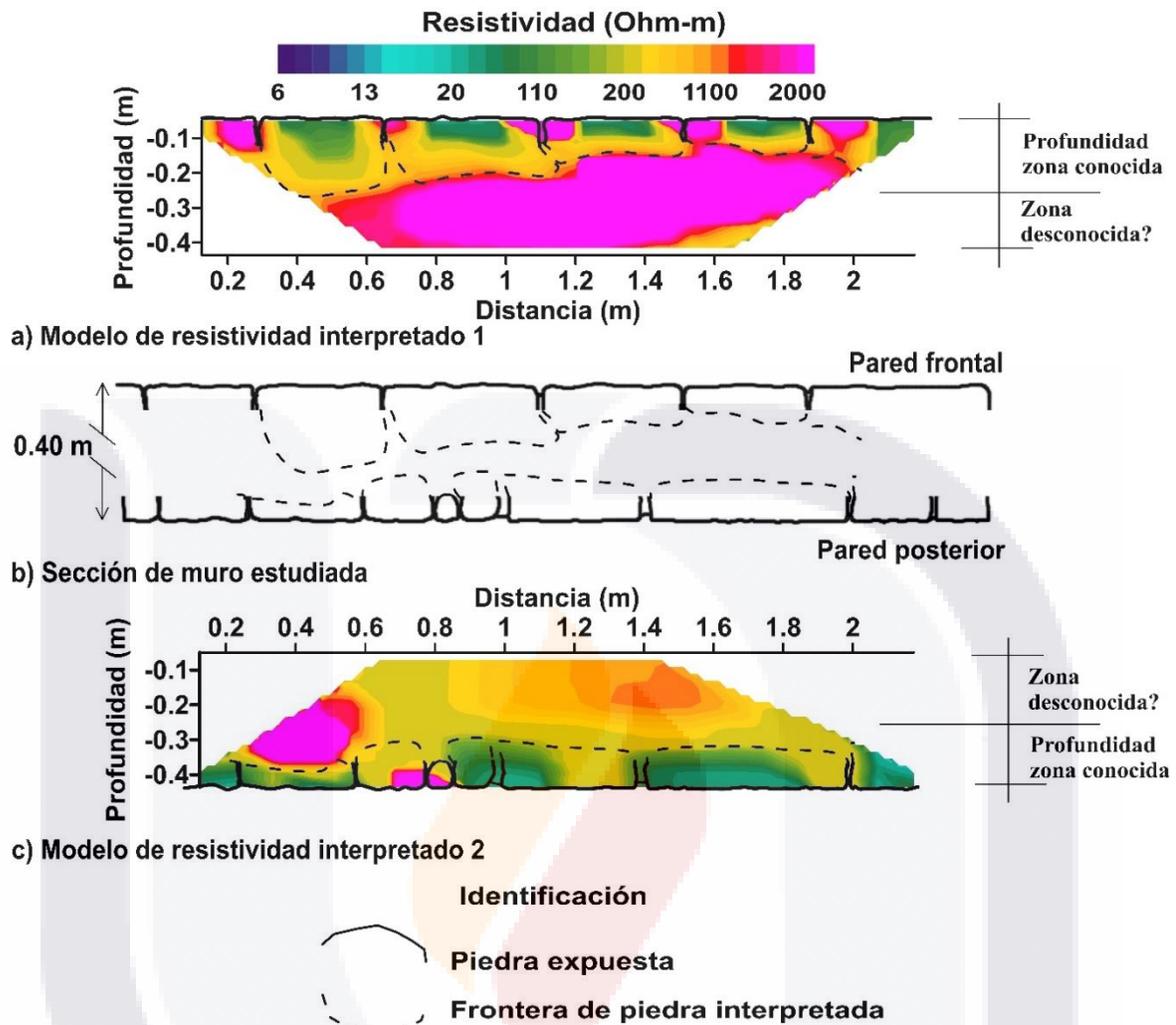


Figura 46. Perfil de la medición manual en pared frontal y pared posterior, longitud 2.30 m y profundidad de 0.40 m. a) Modelo de resistividad interpretado 1 corresponde a la medición en pared frontal. b) Sección de muro estudiado basada en las imágenes laterales de los muros para la proyección de las juntas al interior del muro. c) Modelo de resistividad interpretado 2 en pared posterior.

En ambos modelos (figura 46a y 46c), los datos de resistividad generan formas que coinciden con la geometría de la sección del muro estudiado, por debajo de los 0.25 m de profundidad el modelo muestra datos de resistividad erróneos. Debido a esta imprecisión, no fue posible unir los modelos de resistividad.

Las mediciones manuales implicaron un incremento de tiempo y de mano de obra, comparado con las mediciones automáticas. Sin embargo, se observó un menor error en los datos de resistividad.

7.3.2 Mediciones de ERT en muro 2

En el muro 2 sobre la fachada de la catedral de Aguascalientes, se realizaron 5 mediciones ubicadas en dos sitios diferentes. Al lado derecho de la fachada se llevaron a cabo dos mediciones automáticas a 0.80 y 1.60 m de altura sobre la misma zona con el objetivo de revisar las condiciones de humedad en alturas diferentes del muro. La figura 47 corresponde a la medición realizada a 0.80 m de 1.15 m de longitud y 0.20 m de profundidad.

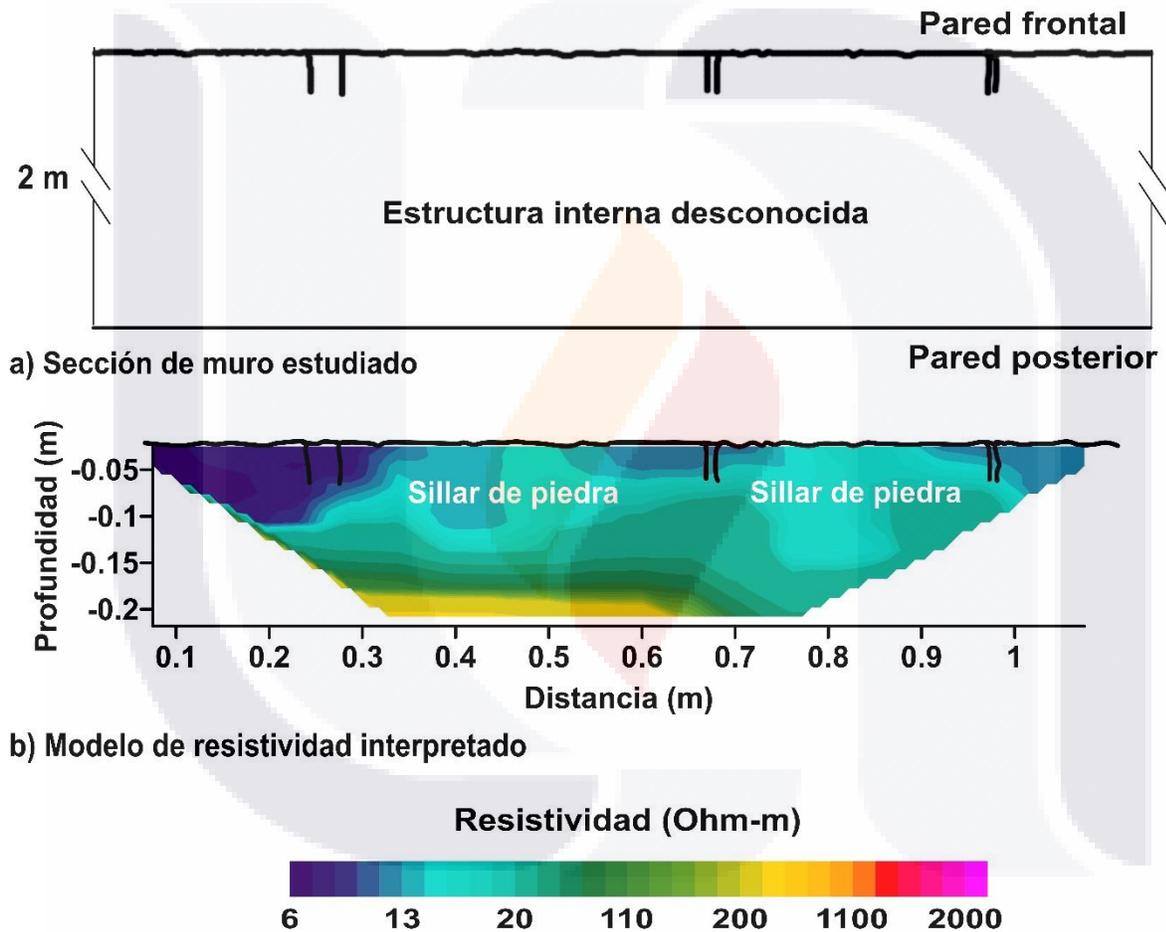


Figura 47. Medición automática de 1.15 m de longitud a una altura de 0.80 m con una profundidad de 0.20 m aprox. a) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del muro para la proyección de las juntas hacia el interior. b) Modelo de resistividad interpretado obtenido de la pared frontal.

El siguiente perfil (figura 48), se obtuvo a una altura de 1.60 m para evitar la zona de mayor humedad, la cual puede observarse en los primeros metros de los muros por el cambio de color y el desgaste de materiales.

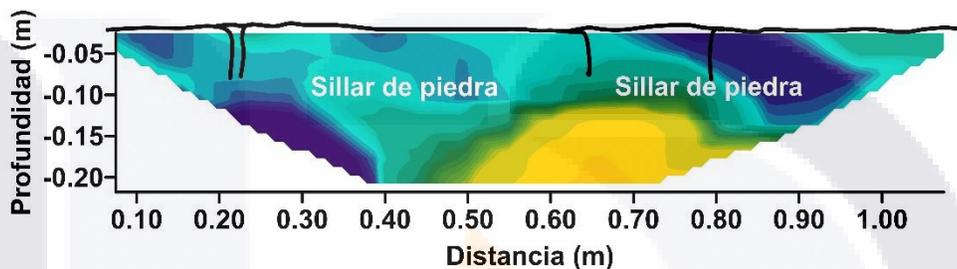
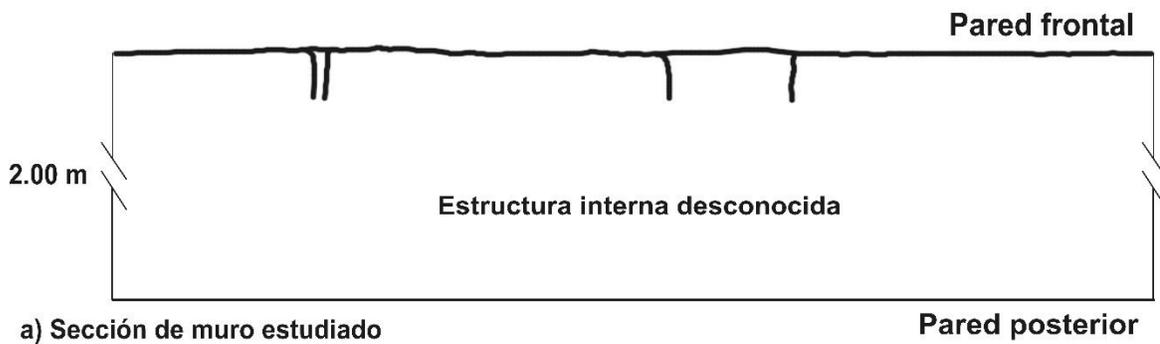


Figura 48. Perfil de medición automática a una altura de 1.7 m, longitud de 1.15 y profundidad de 0.20 m. a) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del muro para la proyección de las juntas hacia el interior. b) Modelo de resistividad interpretado sobre la pared frontal.

Para los modelos mostrados (figura 47, 48, 49 y 50) la clasificación de las zonas se dividió en dos, la primera zona corresponde a sillar de piedra con resistividades de 0 a 200 Ω m y la segunda zona es mortero, fragmentos de roca y huecos, con valores de 200 a 2000 Ω m. En este modelo se consideró una variación en el rango de resistividad, ya que el modelo contiene una pequeña zona con resistividades por debajo de los 6 Ω m, límite mínimo considerado en los demás perfiles.

La medición 3 se realizó al lado derecho de la fachada, a una altura de 0.80 m. La primera mitad de la línea de medición se colocó sobre una zona con fuerte desgaste y la otra mitad en una zona poco alterada. Esta condición se puede observar en la figura 49, al lado derecho de la imagen del muro se observa una superficie desgastada en color oscuro debido a la humedad, y a la izquierda se muestra una roca de color claro con una superficie poco alterada.

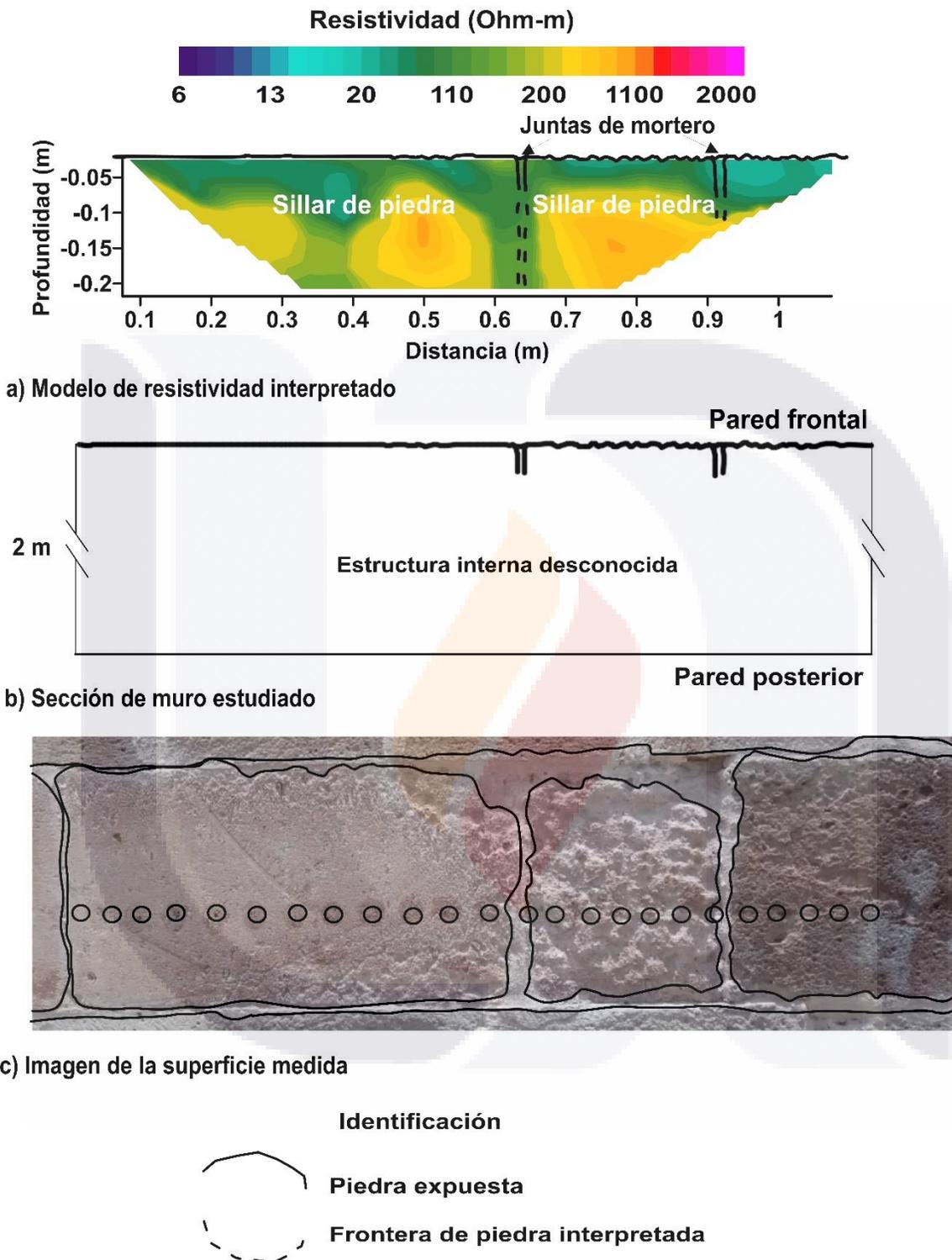
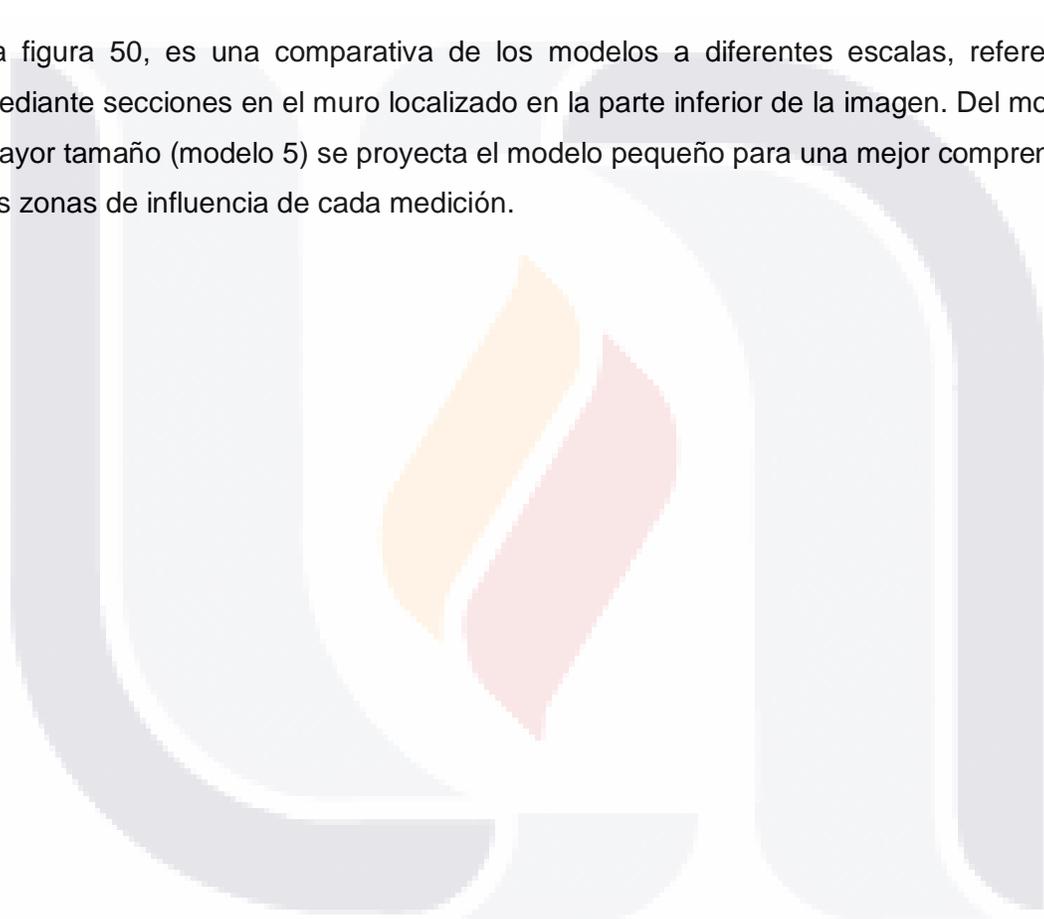


Figura 49. Perfil de medición automática, longitud de 1.15 m y profundidad de 0.20 m. En la parte inferior se muestra la imagen de la zona de medición. a) Modelo de resistividad interpretado obtenido de la pared frontal. b) Sección de muro estudiado basada en la imagen lateral del muro para la proyección de las juntas hacia el interior. c) Imagen de la superficie medida con la ubicación de los puntos de contacto de los electrodos.

Las mediciones cuatro y cinco se realizaron de forma manual con separación de electrodos a cada 0.20 y 0.30 m, respectivamente (figura 50). En la medición 4 se logró obtener datos a profundidades de hasta 0.80 m (figura 50a); en la medición 5 se profundizó a 1.20 m máximo (figura 50b). Las dos mediciones se realizaron sobre la misma línea (altura de 1 m) con el propósito de comparar los modelos con diferente resolución, además de analizar los alcances de cada medición, así mismo, poder definir mejor la geometría interna del muro.

La figura 50, es una comparativa de los modelos a diferentes escalas, referenciados mediante secciones en el muro localizado en la parte inferior de la imagen. Del modelo de mayor tamaño (modelo 5) se proyecta el modelo pequeño para una mejor comprensión de las zonas de influencia de cada medición.



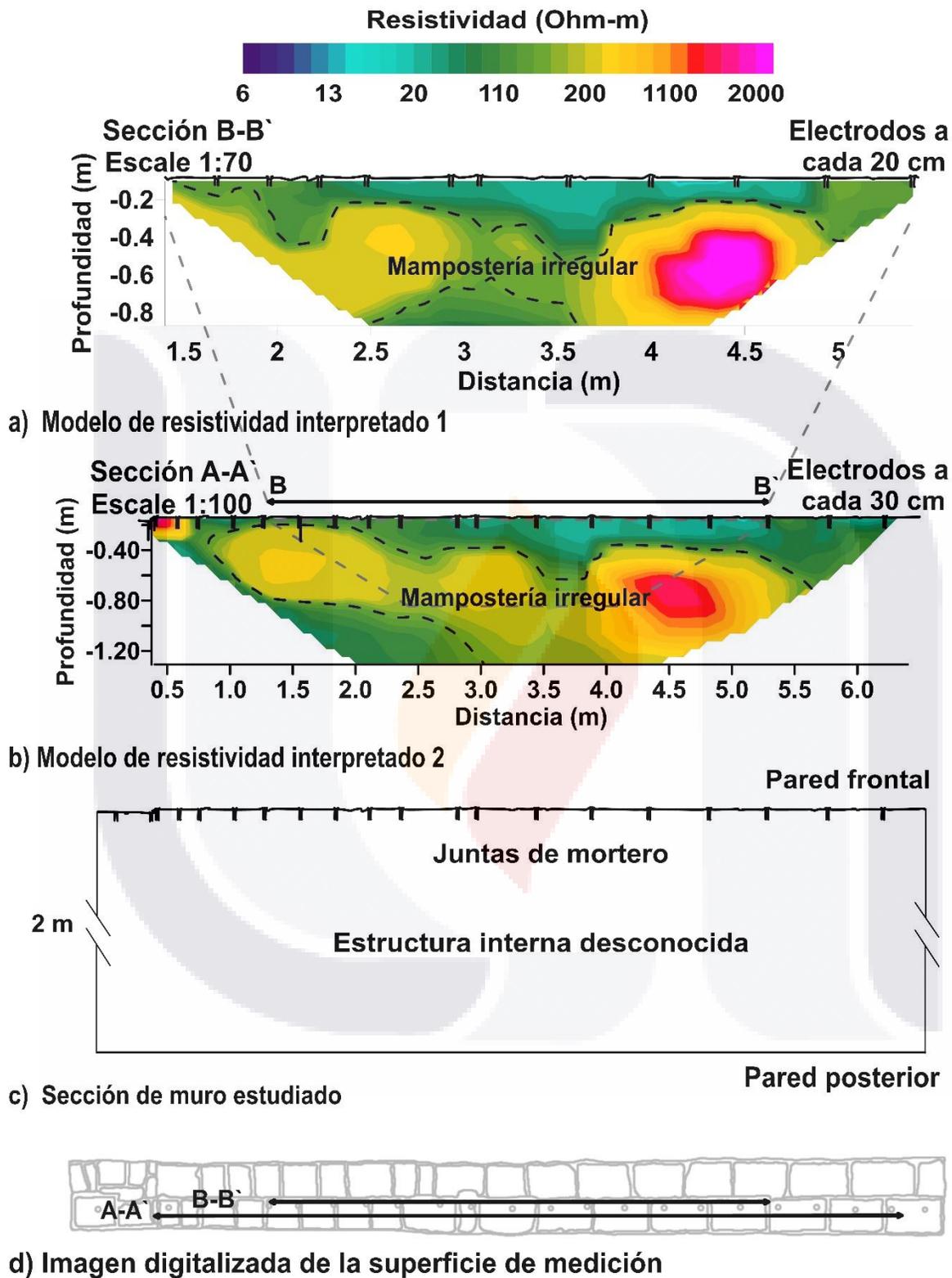


Figura 50. Modelos de medición manual a 1 m de altura. a) Modelo de resistividad interpretado 1, longitud 4.6 m, electrodos a cada 0.20 m. b) Modelo de resistividad interpretado 2, longitud 6.9 m, electrodos a cada 0.30 m. c) Sección de muro estudiado.

7.4 Discusión de resultados

7.4.1 Muro 1

La sección del muro obtenida de la unión en espejo de los modelos de las mediciones automáticas por ambos lados (figura 44) aporta datos geométricos precisos y con buena resolución, ya que se observa claramente las hojas que integran el muro y su composición interna. La precisión del tamaño de los elementos y las interfaces de conexión es de aproximadamente ± 0.02 m.

En los modelos sobre la pared frontal y la pared posterior (figura 44b) se definen con precisión los elementos que integran los muros, además coinciden los altos valores de resistividad (figura 44b) con las juntas de mortero observadas en la sección vista de planta del muro (figura 44a). Sin embargo, existe una variación en la profundidad de la roca debido a la ubicación de la línea sobre el muro. En la pared frontal, la línea de medición pasa por el centro de una hilada de rocas, en donde se tiene mayor profundidad en el muro, lo que permite obtener datos de la capa de roca a una profundidad de 0.20 m promedio. En el modelo obtenido en la pared posterior la línea de medición pasa por un extremo de la roca y próxima la junta horizontal, por tal motivo la roca tiene menor profundidad; en la imagen (figura 44b) se observa una capa de 0.10 m de espesor promedio. En la parte central se observa un núcleo que podría ser identificado como una mezcla de mortero, piedra y vacíos, con valores mayores a $1600 \Omega\text{m}$.

La figura 46 que corresponde a la medición manual con electrodos a cada 10 cm muestra la interface entre la roca y el mortero, así como las zonas dañadas por la humedad. En el modelo se observa que a mayor profundidad se pierde definición de las formas de los elementos, es decir, aumenta el error en los datos, esto se presenta por debajo de los 0.20 m de profundidad, mostrando solamente una capa de roca y parte del núcleo (mortero, piedra y vacíos).

A diferencia del modelo automático, el modelo obtenido manualmente muestra una gran imprecisión en la definición de las juntas verticales en el sentido horizontal, ampliándose las juntas hasta 10 veces mayor a la dimensión real, lo que confirma que el método dipolo-dipolo es impreciso en la detección de estructuras horizontales. Sin embargo, el modelo de resistividad interpretado 1 sobre la pared frontal en todos los casos coinciden los cambios de resistividad superficiales en tonos de rosa ($>1900 \Omega\text{m}$) con las juntas

verticales observadas en la sección vista frontal (figura 46b). En cambio, en el modelo de resistividad interpretado 2 sobre la pared posterior no coinciden las juntas localizadas desde 0.60 a 1.20 m, debido a la presencia de elementos de pequeño tamaño. Al profundizar los 0.40 m de la sección se esperaba observar las dos hojas externas y el núcleo, sin embargo en este modelo solo es de utilidad los datos hasta 0.20 m de profundidad.

Al realizar mediciones en un muro con dos o más hojas se presentan inconvenientes como los descritos en el párrafo anterior, debido a la variación de la geometría de la roca y a la alta heterogeneidad presentada por ambos lados del muro.

La clasificación llevada a cabo para correlacionar los rangos de resistividad con el tipo de material se estableció con base en la literatura, observaciones in situ e imágenes obtenidas durante la medición de la sección expuesta de los laterales del muro y del núcleo interno expuesto. En la identificación de los tipos de material se consideró el nivel del contenido de humedad en los materiales, la degradación del material producto de la intemperización y el grado de porosidad o vacíos, principalmente en el núcleo de los muros, los cuales comúnmente se conforman de mezcla de mortero y piedra colocados sin cuidado.

7.4.2 Muro 2

En la figura 47, que corresponde a la medición 1 sobre la fachada de la catedral al lado derecho, se observa un alto contenido de humedad con valores de resistividad de 6 a 180 Ω m a una profundidad de hasta 0.17 m, esto puede observarse en el cambio de resistividad mostrado en tonos verde y amarillo. La medición 2 en el mismo sitio pero a una altura de 1.60 m (figura 48) presenta valores bajos de resistividad al igual que la medición 1, sin embargo, en la parte central del modelo por debajo de los 0.12 m de profundidad existe un aumento de la resistividad que podría estar relacionado con una disminución de humedad (figura 50). La determinación de las variaciones de profundidad de la humedad en diferentes alturas del muro mediante ERT permite conocer la altura de afectación de la humedad ascendente en el muro.

En la medición 3 realizada sobre la fachada de la catedral al lado izquierdo a una altura de 0.80 m, se identifican 2 zonas. La zona 1 se ubica en los primeros 0.10 m

(resistividades de 6 a 180 Ω m), la zona 2 ubicada por debajo de los 0.10 m con valores de resistividad de hasta 900 Ω m. En la parte superior derecha del modelo (figura 49a) se observan bajos valores de resistividad, que corresponde a la zona de mayor deterioro con un alto porcentaje de porosidad y humedad contenida. En general el modelo muestra valores de resistividad bajos, lo que significa una fuerte presencia de humedad en los primeros 0.10 m de profundidad. El modelo 3 en comparación con el modelo 1, ubicados a la misma altura sobre el piso pero en distinta ubicación, aporta mayor definición de la parte superficial del muro, así como también presenta una disminución de la resistividad en las juntas de mortero (100 Ω m promedio). En el muro 2 la resistividad del mortero es menor que la del muro 1 debido las propiedades del mortero cal-arena, esto pudo notarse durante las mediciones para ambos tipos de juntas, al presentar una mayor dureza las juntas de mortero cemento-arena en el muro 1.

Los modelos 4 y 5 realizados al lado izquierdo de la fachada de la catedral (figura 50) se muestran con una resistividad media, entre 20 y 200 Ω m. Los dos modelos confirman la existencia de una zona de alta resistividad ubicada entre los 4 y 5.2 m de longitud, desde los 0.30 a 0.90 m de profundidad, relacionado con la existencia de material de alta densidad o inclusive podría significar la presencia de criptas dentro de los muros debido a la dimensión de la anomalía. También se observa una zona de baja resistividad en el rango de 1.5 y 2.4 m de longitud por debajo de los 0.80 m de profundidad, relacionado con roca en condiciones húmedas en la pared interior del muro. Finalmente, la zona de baja resistividad ubicada en los primeros 30 cm de profundidad está relacionada con material intemperizado húmedo (roca húmeda), esta zona húmeda se ubica a la derecha del muro, lo que coincide con la imagen mostrada en la figura 49c.

Es probable que el muro 2, esté conformado por un bloque superficial de cantera de 0.20 m de espesor promedio debido a que en todos los modelos (figura 47, 48, 49 y 50) se muestra una capa de diferente resistividad al núcleo interno. Si la suposición anterior resulta correcta, el muro se construyó en una primera etapa de mampostería de piedra de forma irregular y posteriormente se colocó la chapa de cantera en conjunto con la ornamentación y pilares centrales de fachada.

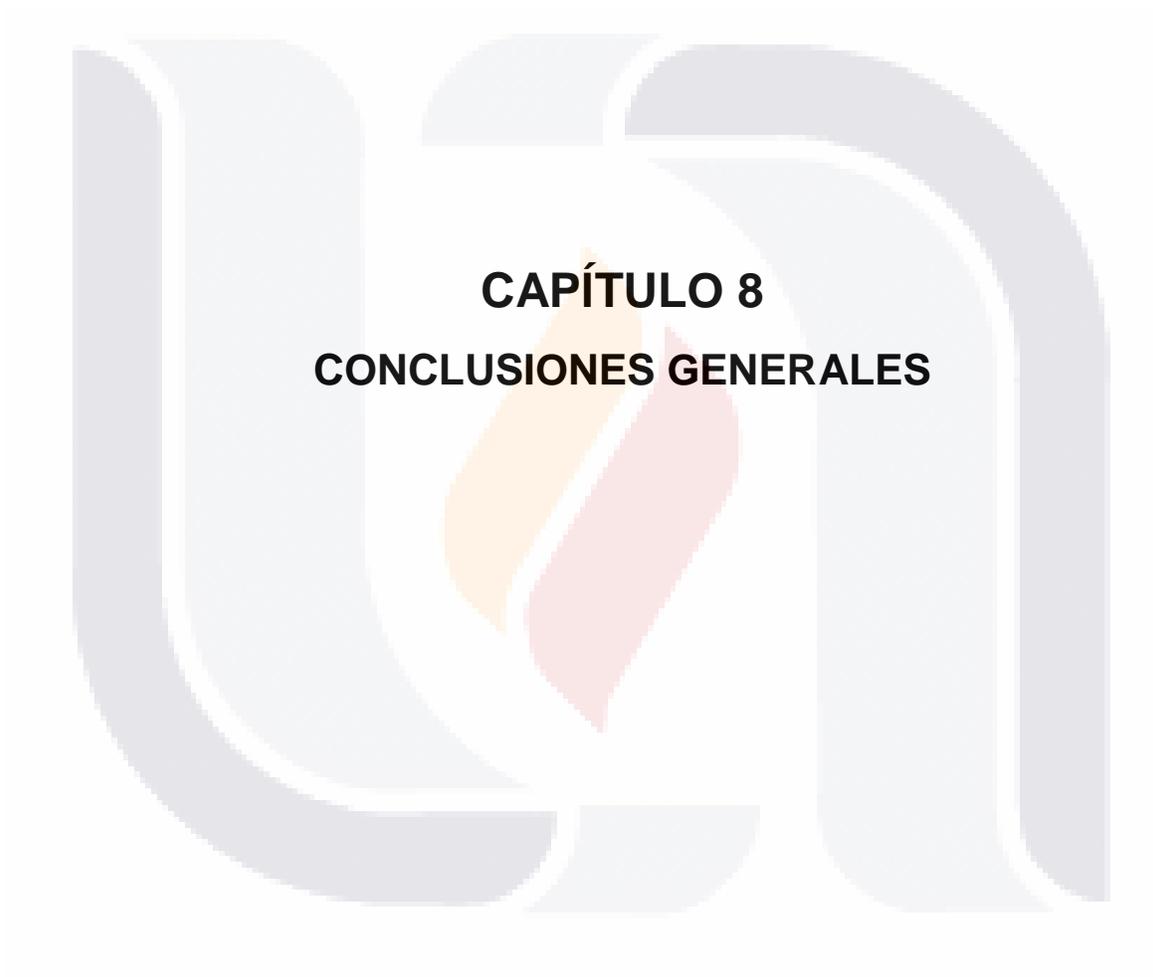
7.5 Conclusiones

El método de resistividad eléctrica adaptado en edificios históricos resultó altamente efectivo debido a la calidad en la definición de la geometría interna de los elementos estructurales de mampostería, principalmente en mediciones con electrodos a cada 0.05 m. Aunque, el empleo de mediciones con diferente separación entre electrodos resulta viable para la confirmación de resultados además de lograr una mayor profundidad.

El sistema de acero para la sujeción, colocación y presión de electrodos es un equipo práctico y factible para la aplicación automática del método. Aun cuando los resultados presentan errores en el rango del 15 a 40%, se consideran ya que coinciden con los resultados de las mediciones manuales con errores menores al 10%. Este error tan alto es debido a la deficiente transmisión de corriente en la superficie del muro generada por la baja presión ejercida por los electrodos. Es necesario hacer modificaciones en el sistema que permita lograr una transmisión más efectiva y obtener resultados con mayor precisión, además se requiere fabricar más módulos para realizar mediciones automáticas de mayor alcance.

Cabe mencionar que no se encontró en la literatura resultados como los mostrados en este trabajo de investigación. Es decir, los modelos presentados en anteriores trabajos no son tan claros en la definición de la geometría y detección de anomalías. Aun cuando los resultados son prometedores, se requiere llevar a cabo una etapa experimental con modelos a escala real en condiciones controladas de laboratorio, así como materiales y geometrías internas definidas para la implementación del método, con el objetivo de reducir y correlacionar los rangos de resistividad para los diferentes tipos de materiales usados en elementos de mampostería de piedra, de esta manera reducir la incertidumbre de mediciones futuras.

La combinación de los NDT en la evaluación de edificios históricos es considerada indispensable para la obtención de las propiedades físicas, geométricas y mecánicas. Es importante que en México se implementen este tipo de mediciones no solo en monumentos de reconocimiento internacional sino también en edificaciones que realmente requieran de un análisis a fondo debido a afectaciones estructurales que pongan en riesgo la condición estructural del edificio.



CAPÍTULO 8
CONCLUSIONES GENERALES

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES

La metodología desarrollada propicia un análisis integral de los edificios, ya que se consideran aspectos técnico-constructivos de la historia del edificio estudiado, desde su construcción inicial hasta la actualidad. Integra además datos geométricos de la configuración interna de elementos estructurales (acomodo de las rocas en la mampostería) e información de su condición de deterioro actual, mediante la observación y caracterización en “in situ” y en laboratorio, y mediante la obtención de modelos fogramétricos. Además la metodología puede emplearse como una herramienta para monitorizar el avance del deterioro o en su caso la mejora después de una intervención.

El estudio de los edificios históricos de la región permitió conocer los principales sistemas constructivos de mampostería empleados en la época de su construcción. Fue posible observar que la heterogeneidad de los materiales y sistemas constructivos se relaciona con la resistencia de los elementos. Con la catalogación de los sistemas constructivos fue posible identificar rasgos característicos importantes que afectan la resistencia de los elementos, tales como los porcentajes de los materiales en un área determinada. Un alto porcentaje de ripio podría significar una disminución de la capacidad de carga de los elementos estructurales, o en su caso una zona de fragilidad que provoque una redistribución de cargas o agrietamientos debido a concentraciones de esfuerzos.

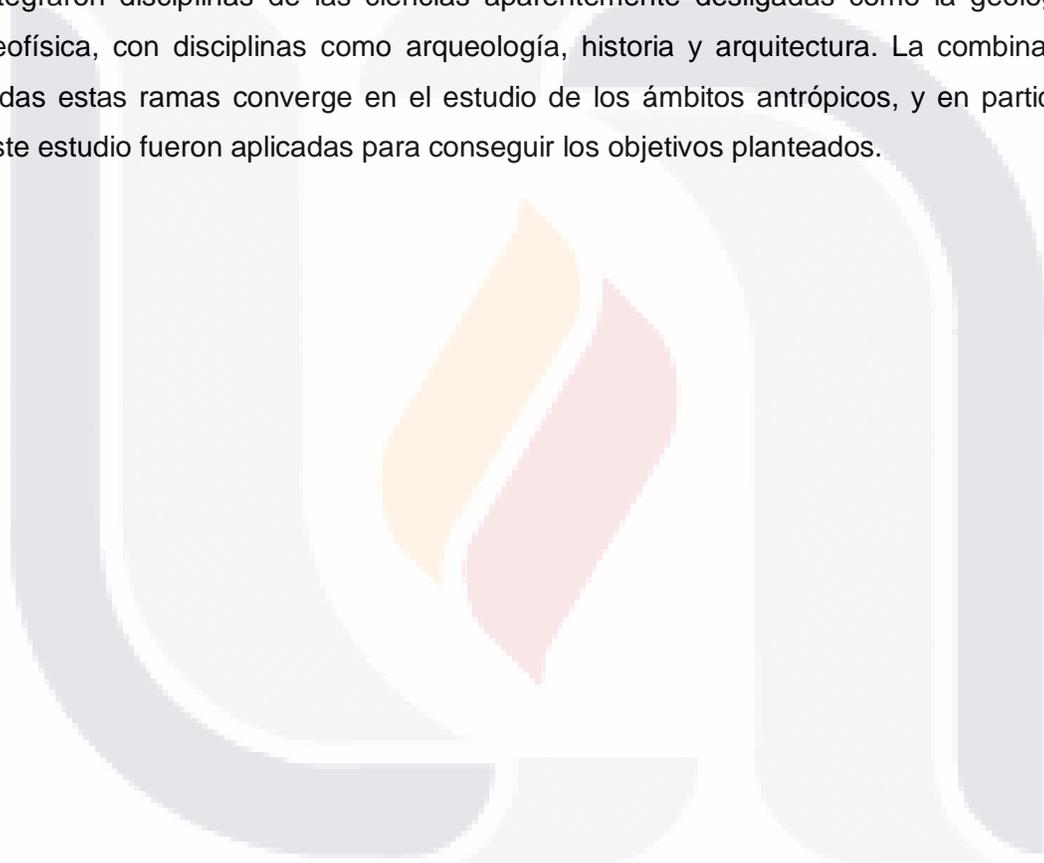
No se logró la completa determinación de la geometría de la catedral mediante la fotogrametría. Aunque la aplicación de este método en su modalidad de largo alcance no arrojó los resultados esperados, la modalidad de corto rango, resultó ser una herramienta para la documentación de patologías y deterioro de zonas de difícil acceso, además, es útil en la determinación del volumen de material perdido por intemperismo y erosión.

La caracterización petrográfica y petrofísica de las rocas que conforman la mampostería de los muros de la catedral permitió identificar el tipo de roca, su grado de deterioro y su potencial para deteriorarse. Esta parte de la metodología podría usarse para identificar las rocas más adecuadas para la restitución durante trabajos de restauración.

El método ERT resultó ser el método más confiable para la determinación de la geometría interna de los elementos de mampostería histórica. En la literatura revisada no reportan datos geométricos internos de elementos de mampostería con la resolución obtenida en este trabajo.

La combinación de ERT y la caracterización petrofísica y petrográfica en la evaluación de la condición de salud del patrimonio edificado aumenta el nivel de confianza de los datos que se obtienen, por lo que se espera que la metodología desarrollada en este trabajo sea aplicada para los diagnósticos previos a los trabajos de restauración, y para los trabajos de simulación numérica del comportamiento de edificios de mampostería.

Está claro que la interdisciplinaridad es indispensable y que puede requerirse de una gran cantidad de especialistas según la complejidad del estudio. En esta investigación se integraron disciplinas de las ciencias aparentemente desligadas como la geología y la geofísica, con disciplinas como arqueología, historia y arquitectura. La combinación de todas estas ramas converge en el estudio de los ámbitos antrópicos, y en particular en este estudio fueron aplicadas para conseguir los objetivos planteados.







CAPÍTULO 9
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

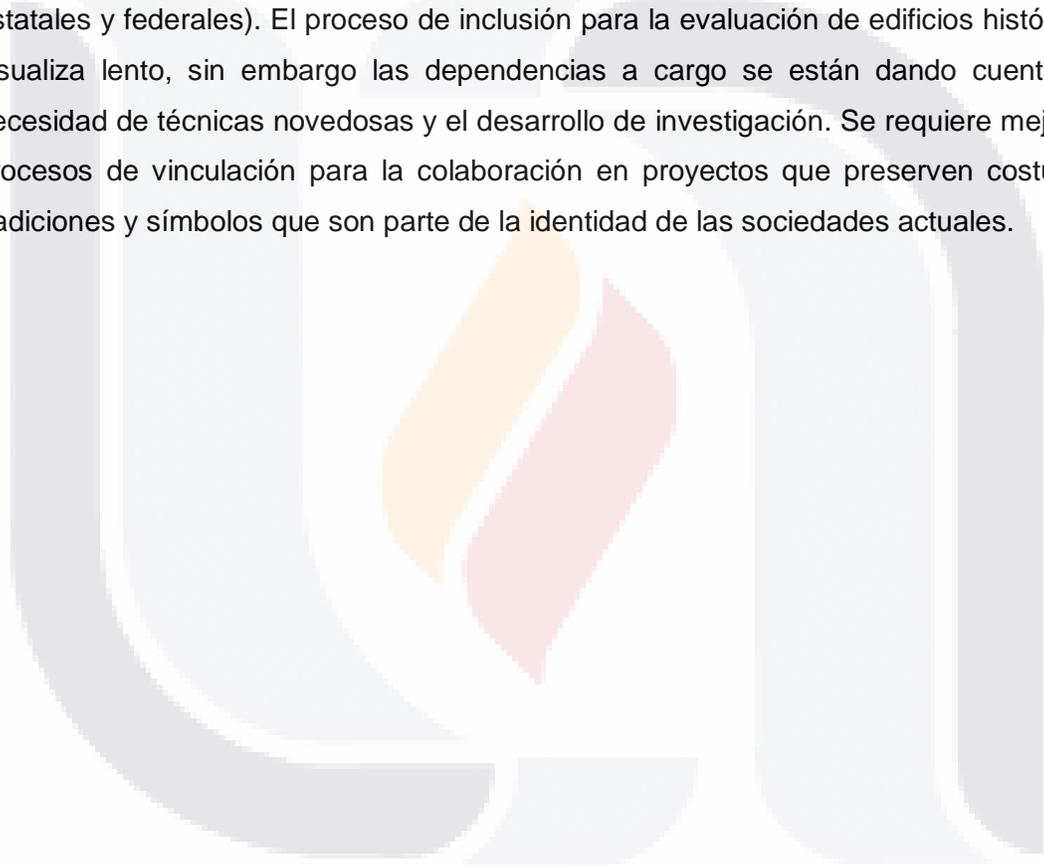
El tema de investigación resulta de interés tanto para investigadores y estudiantes de posgrado que trabajan en el área del Patrimonio edificado, así como para las Dependencias Gubernamentales a cargo de preservar, conservar y mantener edificios históricos.

Durante el desarrollo de investigación doctoral se identificaron líneas de investigación que no fueron abordadas pero que pudieran resultar de interés y ser pertinentes para el área de patrimonio edificado. A continuación se mencionan los capítulos con posibles líneas o perspectivas de investigación:

1. El capítulo 3 sobre los antecedentes técnico-constructivos de la catedral. Aunque se realizó una investigación a profundidad en las diferentes bibliotecas o sitios de archivos históricos, ésta se limitó en tiempo por lo que quedaron varios aspectos sin documentar que pudieran ser de gran utilidad para aclarar incógnitas sobre procesos constructivos y tipos de materiales usados. Es por esto que se propone como una futura línea de investigación el continuar con el tema de documentación histórica.
2. En el capítulo 4 se muestra la técnica fotogramétrica como una herramienta prometedora para la caracterización geométrica así como en el monitoreo de la evolución del deterioro de los edificios históricos. Por lo que se considera relevante continuar con el monitoreo de la catedral en conjunto con otros edificios o monumentos de interés, sobre todo mediante la implementación de la fotogrametría de corto alcance.
3. Los resultados de la metodología implementada en la determinación de propiedades mecánicas a partir de datos cualitativos fueron muy congruentes con los reportados en la literatura. De ahí que esta técnica podría utilizarse como metodología de caracterización de mampostería en estudios de ingeniería estructural que requieren datos de propiedades mecánicas de dicho material.
4. En la caracterización geométrica interna de elementos de mampostería mediante la ERT (capítulo 7), un experimento que podría mejorar los resultados obtenidos es la implementación de pruebas de resistividad sobre muros construidos con materiales y sistemas constructivos conocidos, con el objetivo de obtener datos de calibración y disminuir la incertidumbre en la interpretación. Mediante un proceso

comparativo de las resistividades en los perfiles y el conocimiento a detalle de la geometría de los muros podría ser posible correlacionar rangos mínimos de resistividad a los diferentes tipos de materiales.

Es importante dar a conocer las ventajas y los alcances obtenidos de las evaluaciones realizadas en los diferentes edificios históricos con el objetivo de ser tomados en cuenta en programas de restauración y conservación del patrimonio edificado implementados por las instituciones o dependencias gubernamentales (INAH, gobiernos municipales, estatales y federales). El proceso de inclusión para la evaluación de edificios históricos se visualiza lento, sin embargo las dependencias a cargo se están dando cuenta de la necesidad de técnicas novedosas y el desarrollo de investigación. Se requiere mejorar los procesos de vinculación para la colaboración en proyectos que preserven costumbres, tradiciones y símbolos que son parte de la identidad de las sociedades actuales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Georgopoulos, G. Ioannidis, 2004. Fotogramétrico y métodos de encuesta para la grabación geométrica de los monumentos arqueológicos, estudios arqueológicos. Semana de Trabajo de FIG 2004 Atenas, Grecia, 22-27 de mayo.

Abu-Zeid, N., Botteon, D., Cocco, G., & Santarato, G. (2006). Non-invasive characterisation of ancient foundations in Venice using the electrical resistivity imaging technique. *NDT & E International*, 39(1), 67–75. doi:10.1016/j.ndteint.2005.06.007

Ahmad, A., 2012, Characterization of natural and consolidated stones from Jordan with non-destructive ultrasonic technique and physico-mechanical methods (Doctoral dissertation, Technical University of Dortmund, Dortmund, Germany).

Ahmad, A., Simon, S., Middendorf, B., 2012, Stone properties and damage induced by salt crystallisation in some Jordanian stones. 12th International congress on the deterioration and conservation of stone Columbia University, New York.

Almeida, C., Guedes, J. P., Arêde, A., Costa, C. Q., & Costa, A. 2012. Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 30(0), 188–197. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043>

Al-Saad, Z., y Abdel-Halim, M.A., 2001, La evaluación de laboratorio de varios tipos de morteros para la conservación del monumento Qasr al-Bint, Petra-Jordania. *Estructuras de ingeniería*, 23 (8), 926-933.

Azkarate, A., Ruiz De Ael, M. J., & Santana, A. 2003. El patrimonio arquitectónico. Plan Vasco de Cultura”. Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz, Spain.

Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14(4), 199–233. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0)

Binda, L., Cantini, L., & Tedeschi, C. 2013. Diagnosis of historic masonry structures using Non-Destructive techniques. In *Non destructive Testing of Materials and Structures* (pp. 1089-1102). Springer Netherlands.

Bonazza, A., Brimblecombe, P., Grossi, C.M., Sabbioni, C., 2007, Carbon in black layers at the tower of London. *Environ Sci Tech* 41:4199–4204.

Borri, A., Corradi, M., Castori, G., & De Maria, A. 2015. A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2647-2665.

Borri, A., & De Maria, A. 2009. Eurocode 8 and Italian Code. A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings. In *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop* (pp. 237-246).

Bosiljkov, V., Uranjek, M., Zarnic, R., y Bokan-Bosiljkov, V. 2010. Un enfoque integrado de diagnóstico para la evaluación de las estructuras de mampostería históricos. *Diario del patrimonio cultural*, 11 (3), 239-249.

Capel, H. 1996. La rehabilitación y el uso del patrimonio histórico industrial. *Documents d'anàlisi geogràfica*, (29), 019-50.

Cassar, J., 2002. Deterioration of the Globigerina Limestone of the Maltese Islands. In: Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. (Eds.), *Natural Stones, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*: Geological Society, London, Special Publications, 205, pp. 33–49.

Cnudde, V., Cwirzen, A., Masschaele, B., Jacobs, P.J.S., 2009. Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes. *Eng. Geol.* 103, 76–83.

Corpus, R. (s.f). *La catedral y su cabildo*. Aguascalientes, Ags.

deGroot-Hedlin, C., Constable, S. 1990. "Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data", *Geophysics*, 55, 1613-1624.

De la Torre Rangel, O., Vázquez, R. L., Hernández, A. S., & Cabrera, J. R. 2004. Evaluación estructural y comportamiento de las reparaciones efectuadas a edificaciones históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (70), 1-26.

DIN EN 772-4: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 4: Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein; dt. Fassung (Beuth, 1998).

DIN 66133: Determination of pore volume distribution and specific surface area of solids by mercury intrusion (Beuth, 1993).

DIN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (Beuth, 1987).

DIN 22024: Bestimmung der Spaltzugfestigkeit von Festgesteinen (Beuth, 1989).

Feilden, B., 2007, La conservación de edificios históricos. Routledge.

Fisher, R.V., 1966, Rocks composed of volcanic fragments. In: Earth Sci. Rev., 1: 287-298; Amsterdam.

Fitzner, B., Basten, D., 1994, Gesteinsporosität—Klassifizierung, meßtechnische Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz—Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm “Steinzerfall-Steinkonservierung” 1992, Förderprojekt des Bundesministers für Forschung und Technologie. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Fitzner, B., 1970, Die Prüfung der Frostbeständigkeit von Naturbausteinen. Geol Mitt 10:205–296.

Fitzner, B., Snethlage, R., 1983, Modellvorstellungen zum Kristallisations- und Hydratationsdruck von Salzen im Porenraum von Sandsteinen. Sitzungsbericht des Arbeitskreises ‘Naturwissenschaftliche Forschung and Kunstgütern aus Stein’, Erlangen.

Flatt, R. J., Caruso, F., Sanchez, A. M. A., Scherer, G. W. 2014. “Chemo-mechanics of salt damage in stone”. Nature Communications, 5, 4823.

Franzoni, E., Bandini, S., y Graziani, G., 2014, El aumento de la humedad, las sales y los efectos electrokinéticos en mamposterías antiguas: a partir de las pruebas de laboratorio de seguimiento sobre el terreno: Revista de Patrimonio Cultural, 15 (2), 112-120.

Fuentes, J. A., 2014. Estudio Geofísico. Evaluación y análisis de las condiciones geofísicas y geológicas. Catedral Metropolitana de la ciudad de Aguascalientes. Aguascalientes: Juan Antonio Fuentes Lopez, pp.17, 20, 26, 27, 28.

Fusi, N., & Martinez-Martinez, J., 2013, Mercury porosimetry as a tool for improving quality of micro-CT images in low porosity carbonate rocks. Engineering Geology, 166, 272-282.

García, S. A. 2004. La protección y aprovechamiento del patrimonio edificado. *Gaceta Territorio Ambiental*, 2(6).

Goudie, A. S., & Viles, H. A. *Salt Weathering Hazards* (John Wiley & Sons, Ltd, 1997).

G.N. Tsokas, P.I. Tsourlos, G. Vargemezis, M. Novack. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. *Archaeological Prospection*, 15 (2008), pp. 47–61

Guadagnuolo, M., Faella, G., Donadio, A., & Ferri, L. 2014. Integrated evaluation of the Church of S. Nicola di Mira: Conservation versus safety. *NDT & E International*, 68(0), 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.08.002>

Guimarães, A.S., Delgado, J.M., y de Freitas, V.P., 2016, El tratamiento de la humedad por capilaridad en edificios históricos: la campaña experimental de ventilación de la base del muro y análisis de los efectos de la interfaz, *Diario del patrimonio cultural*, 20, 733-738.

Gutiérrez, J. A. G. 1999. *Historia de la iglesia Católica en Aguascalientes (Vol. 1). Parroquia de la Asunción*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Hendrickx, R., 2013, Usando el tubo de Karsten para estimar los parámetros de transporte de agua de los materiales de construcción porosos, *Los materiales y estructuras*, 46 (8), 1.309-1.320.

Hernández, J. 2006, *La ciudad y su análisis intra-urbano: la localización de actividades económicas y el futuro de los centros*, documento disponible en [<http://www.eumed.net/ce/2006/jha-ciu.htm>], consultado en enero del 2010.

Hirschwald, J., 1912, *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Verwitterungsbeständigkeit*, Verlag W Ernst & Sohn, Berlin.

ICOMOS, I. (2008). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*.

Klobes, P., Riesemeie, H., Meyer, K., Goebbles, J., Hellmuth, K.H., 1997, Rock porosity determination by combination of X-ray computerized tomography with mercury porosimetry, *Fresenius J. Anal. Chem.* 357, 543–547.

Kılıç, A., & Teymen, A. 2008. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 237.

Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., & Bosiljkov, V. 2015. Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 203-236.

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., & Wilkinson, P. B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156.

Lombillo Vozmediano, I. 2010. Investigación teórico-experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido. Universidad de Cantabria.

Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernández-Álvarez, J. P., & Norambuena-Contreras, J. (2013). Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. *Construction and Building Materials*, 43(0), 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.007>

López-Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R., y Siegesmund, S., 2013, La expansión de la humedad asociada a la porosidad secundaria: un ejemplo de la Loseros Tuff de Guanajuato, México, *Ciencias de la tierra del medio ambiente*, 69 (4), 1189 a 1.201.

López-Doncel, R., Wedekind, W., Leiser, T., Molina-Maldonado, S., Velasco-Sánchez, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón-Robles, A. & Siegesmund, S., 2016, Salt bursting tests on volcanic tuff rocks from Mexico, *Environ Earth Sci* 75:212 DOI 10.1007/s12665-015-4770-3.

Lucia, F.J., 1983, Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space, *J Petrol Tech* 35:626–637.

Lucia, F.J., 1995, Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization, *Am Assoc Petrol Geol Bull* 79:1275–1300.

Lucia, F.J., 1999, Carbonate reservoir characterization. Springer, Berlin.

Maierhofer, C., & Leipold, S. (2001). Radar investigation of masonry structures. *NDT & E International*, 34(2), 139–147. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00038-4)

Martinho, E., Dionísio, A., Almeida, F., Mendes, M., y Grangeia, C. 2014. Geofísica enfoque integrado para el diagnóstico de deterioro de la piedra en el patrimonio cultural. *Construcción y Materiales de Construcción*, 52, 345-352.

Mercado López, E. (2011). Patrimonio edificado de propiedad privada: relación compleja y contradictoria entre lo público y lo privado en el Centro Histórico de Morelia. *Intervención (México DF)*, 2(4), 27-34.

Milani, G., Esquivel, Y. W., Lourenço, P. B., Riveiro, B., & Oliveira, D. V. 2013. Characterization of the response of quasi-periodic masonry: Geometrical investigation, homogenization and application to the Guimarães castle, Portugal. *Engineering Structures*, 56(0), 621–641. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.040>

Montemagno, C.D., Pyrak-Nolte, L.J., 1999, Fracture network versus single fractures: measurement of fracture geometry with X-ray tomography, *Phys, Chem. Earth* 24 (7), 575–579.

Mosch, S., & Siegesmund, S., 2007, Statistische Bewertung gesteintechnischer Kenndaten von Natursteinen, *Z dtsh Ges Geowiss* 158(4):821–868.

Mosch, S., 2009, Optimierung der Exploration, Gewinnung und Materialcharakterisierung von Naturwerksteinen, <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2009/mosch/mosch.pdf>, Accessed 20 July 2010.

Nicholson, D.T., 2001, 'Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones', *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 819-838.

O. Sass, H.A. Viles. Two-dimensional resistivity surveys of the moisture content of historic limestone walls in Oxford, UK: implications for understanding catastrophic stone deterioration. *Geological Society of London. Special Publication*, 331 (2010), pp. 237–249 <http://dx.doi.org.dibpxy.uaa.mx/10.1144/SP331.22>

Orbán, Z., & Gutermann, M. 2009. Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures*, 31(10), 2287–2298. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.04.008>

Panisova, J., Murín, I., Pašteka, R., Haličková, J., Brunčák, P., POHANKA, V. y Milo, P. 2016. Geofísicos huellas dactilares de las estructuras culturales de poca profundidad a partir de mediciones de microgravedad y la GPR en la Iglesia de San Jorge, Svätý Jur, Eslovaquia. *Revista de Geofísica Aplicada*, 127, 102-111.

Pérez-Gracia, V., Caselles, J. O., Clapés, J., Martínez, G., & Osorio, R. 2013. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. *NDT & E International*, 59(0), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.04.014>

Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82.

Poschlod, K., 1990, *Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine*, Münchener Geowiss Abh B 7, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.

Quelhas, B., Cantini, L., Guedes, J. M., Porto, F. da, & Almeida, C. 2014. Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls. In A. Costa, J. M. Guedes, & H. Varum (Eds.), *Structural Rehabilitation of Old Buildings* (pp. 131–155). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com.dibpxy.uaa.mx/chapter/10.1007/978-3-642-39686-1_5

Rahn, P.H. 1986, *Geología de ingeniería, un enfoque ambiental*. Elsevier, Amesterdam.

Rovero, L., Alecci, V., Mechelli, J., Tonietti, U., & De Stefano, M. 2016. Masonry walls with irregular texture of L'Aquila (Italy) seismic area: validation of a method for the evaluation of masonry quality. *Materials and Structures*, 49(6), 2297-2314.

RILEM TC-25 PEM, 1980, pruebas recomendadas para medir el deterioro de la piedra y para evaluar la eficacia de los métodos de tratamiento, *Mater Struct* 13 (75): 175-253 (en francés).

Rirsch, E., y Zhang, Z., 2010, Aumento de la humedad en muros de mampostería y la importancia de las propiedades de mortero, *Construcción y Materiales de Construcción*, 24 (10), 1815-1820.

Riveiro, B., Solla, M., de Arteaga, I., Arias, P., & Morer, P. 2013. A novel approach to evaluate masonry arch stability on the basis of limit analysis theory and non-destructive

geometric characterization. *Automation in Construction*, 31(0), 140–148.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.035>

Ruedrich, J., Seidel, M., Kirchner, D. et al., 2005b, Salzverwitterung, hygri sche und thermische Dehnung als auslösende Schadensquantitäten, *Z dtsch geol Ges* 156(1):59–74.

Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R., Siegesmund, S., 2010a, Building sandstone integrity affected by the process of hygric expansion, *Environ Earth Sci*. doi: 10.1007/s12665-010-0767-0.

Seidel K., Lange G., 2007. Direct Current Resistivity Methods, in: Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.-J. (Eds.), *Environmental Geology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 205–237.

Siegesmund, S., & Dürrast, H., 2011, Physical and mechanical properties of rocks. In *Stone in architecture* (pp. 97-225), Springer Berlin Heidelberg.

Siegesmund S., and Snethlage, R. (Eds), 2014, *Piedra en la Arquitectura: Propiedades, durabilidad*.

Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A., 2002, 'Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction', In *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*, Siegesmund, S., Weiss, T., and Vollbrecht, A. (ed.) 1-7, Geological Society, London.

Snethlage, R., & Wendler, E., 1997, Moisture cycles and sandstone degradation, *Environmental Sciences Research Report Es*, 20, 7-24.

Solla, M., González-Jorge, H., Álvarez, M. X., & Arias, P. 2012. Application of non-destructive geomatic techniques and FDTD modeling to metrical analysis of stone blocks in a masonry wall. *Construction and Building Materials*, 36(0), 14–19.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.134>

Song, W., Wang, Y., & Shao, Z. 2017. Categorical modeling on electrical anomaly of room-and-pillar coal mine fires and application for field electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 136, 474-483.

Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from
http://link.springer.com.dibpxy.uaa.mx/chapter/10.1007/978-3-642-39686-1_1

Tavares, A., D'Ayala, D., Costa, A., & Varum, H. 2014. Construction Systems. In A. Costa, J. M. Guedes, & H. Varum (Eds.), *Structural Rehabilitation of Old Buildings* (pp. 1–35).

Török, Á., & Přikryl, R., 2010, Los métodos actuales y tendencias futuras en las pruebas, durabilidad análisis y estudios de procedencias de piedras naturales utilizados en monumentos históricos, *Ingeniería Geológica*, 115 (3), 139-142.

Tsui, N., Flatt, R. J. & Scherer, G. W., 2003, Crystallization damage by sodium sulfate. *J. Cult. Herit.* 4, 109–115.

Viles, H.A., Camuffo, D, Fitz, S. et al., 1997, Group report: what is the state of our knowledge of the mechanisms of deterioration and how good are our estimates of rates of deterioration? In: Baer NS, Snethlage, R. (eds), *Report of the Dahlem workshop on saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures*. Wiley, Hoboken.

Uranjek, M., Žarnić, R., & Bokan-Bosiljkov, V. 2010. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 239–249. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.007>

Zeid, N. A., Balducci, M., Bartocci, F., Regni, R., & Santarato, G. 2010. Indirect estimation of injected mortar volume in historical walls using the electrical resistivity tomography. *Journal of Cultural Heritage*, 11(2), 220-227.

Zheng, W., Li, X., Lam, N., Wang, X., Liu, S., Yu, X., ... & Yao, J. 2013. Applications of integrated geophysical method in archaeological surveys of the ancient Shu ruins. *Journal of Archaeological Science*, 40(1), 166-175.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ANEXO A. TABLAS Y GRÁFICAS

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A PARTIR DE DATOS CUALITATIVOS. ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE BORRI.

En el presente anexo A se muestran una serie tablas y gráficas como parte del procedimiento realizado para la obtención de las propiedades mecánicas de los muros de mampostería.

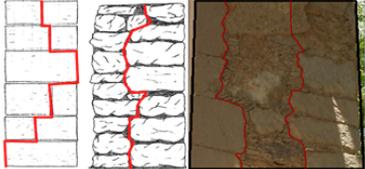
Rangos de valoración de parámetros con respecto a acciones verticales y horizontales					
Identificación	Parámetros	Cargas de acción			Imagen
		Vertical	Horizontal dentro de plano	Horizontal fuera de plano	
SM	Propiedades mecánicas de la piedra	La valoración es de 0.3 a 1, ya que el desgaste en la piedra es un factor de influencia bajo con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0.3 a 1, ya que el desgaste en la piedra es un factor de influencia bajo con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0.5 a 1, ya que el desgaste en la piedra es un factor de influencia bajo con respecto a los demás parámetros.	
SD	Dimensiones de la piedra	La valoración es de 0 a 1, ya que la dimension de los elementos no influye en gran medida en acciones de carga vertical, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1, ya que la dimension de los elementos no influye en gran medida en acciones de carga horizontal, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1, ya que la dimension de los elementos no influye en gran medida en acciones de carga horizontal, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	
SS	Forma de la piedra	La valoración es de 0 a 2, la forma de los elementos provoca un comportamiento altamente variable, se aplica una ponderación alta con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 2, la forma de los elementos provoca un comportamiento altamente variable, se aplica una ponderación alta con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.5, la forma de la piedra tiene influencia ante cargas verticales, se aplica una ponderación media con respecto a los demás parámetros.	
WC	Conexiones de las hojas de muro	La valoración es de 0 a 1.5, la conexión de las hojas tienen influencia ante cargas verticales, se aplica una ponderación media con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.5, la conexión de las hojas tienen influencia ante cargas horizontales en el plano, se aplica una ponderación media con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 2.5, la conexión de las hojas tienen una alta influencia ante cargas horizontales fuera de plano, se aplica una ponderación alta con respecto a los demás parámetros.	

Tabla 1. a) Propuesta de rangos de valoración de los parámetros cualitativos con respecto a acciones de carga verticales y horizontales.

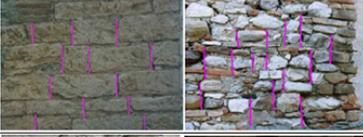
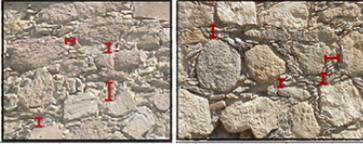
Identificación	Parámetros	Cargas de acción			Imagen
		Vertical	Horizontal dentro de plano	Horizontal fuera de plano	
HJ	Horizontalidad de las juntas o camas horizontales	La valoración es de 0 a 1, la horizontalidad de las articulaciones de camas no influyen en gran medida ante cargas verticales, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1, la horizontalidad de las articulaciones de camas no influyen en gran medida ante cargas horizontales, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.25, la horizontalidad de las articulaciones de camas no influyen en gran medida ante cargas horizontales fuera de plano, se aplica una ponderación media baja con respecto a los demás parámetros.	
VJ	Propiedades de escalonamiento de las juntas verticales	La valoración es de 0 a 1, el escalonamiento de las juntas verticales no influyen en gran medida ante cargas verticales, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1, el escalonamiento de las juntas verticales influyen en menor medida ante cargas horizontales, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1, el escalonamiento de las juntas verticales influyen en menor medida ante cargas horizontales fuera de plano, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	
MM	Propiedades del Mortero	La valoración es de 0 a 1, las propiedades del mortero tienen influencia ante cargas verticales, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.25, las propiedades del mortero tienen influencia ante cargas horizontales, se aplica una ponderación media baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.25, las propiedades del mortero tienen una baja influencia ante cargas horizontales fuera de plano, se aplica una ponderación baja con respecto a los demás parámetros.	
JT	Variación de los espesores de junta	La valoración es de 0 a 1.5, la variación de los espesores de juntas influyen ante cargas verticales, se aplica una ponderación media con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.25, la variación de los espesores de juntas tienen una mediana influencia ante cargas horizontales, se aplica una ponderación media baja con respecto a los demás parámetros.	La valoración es de 0 a 1.25, la variación de los espesores de juntas tienen una mediana influencia ante cargas horizontales fuera de plano, se aplica una ponderación media baja con respecto a los demás parámetros.	

Tabla 1. b) Propuesta de rangos de valoración de los parámetros cualitativos con respecto a acciones de carga verticales y horizontales.

PARÁMETROS	Carga vertical (V)			Carga horizontal dentro del plano (I)			Carga horizontal fuera del plano (O)		
	NC	PC	C	NC	PC	C	NC	PC	C
HJ	0	0.7	1	0	0.5	1	0	1	1.25
WC	0	1	1.5	0	1	1.5	0	1.5	2
SS	0	1.5	2	0	1	2	0	1	1.5
VJ	0	0.5	1	0	0.7	1	0	0.5	1
SD	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MM	0	0.5	1	0	1	1.25	0	0.5	1
SM	0.3	0.7	1	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1
JT	0	1	1.5	0	0.7	1.25	0	0.7	1.25

Tabla 2. Ponderación de parámetros según las condiciones de carga (vertical, horizontal dentro de plano y fuera de plano).

Tipos de mampostería	Resistencia a la compresión	Resistencia a la cizalladura	Módulo de Young	Módulo de corte	Densidad de Peso
	Fm (MPa)	to (MPa)	E (MPa)	G (MPa)	W (kN / m ³) ³
	mínimo máximo	mínimo máximo	mínimo máximo	mínimo máximo	
Mampostería de piedra irregular (guijarros, piedras irregulares, erráticos)	1	0.020	690	230	19
	1.8	0.032	1050	350	
Mampostería de piedra sin labrar con caras de paredes de espesor limitado y el núcleo de relleno	2	0.035	1020	340	20
	3	0.051	1,440	480	
Piedra labrada con una buena unión	2.6	0.056	1500	500	21
	3.8	0.074	1,980	660	
Mampostería de piedra blanda (toba, piedra caliza, etc.)	1.4	0.028	900	300	16
	2.4	0.042	1,260	420	
Mampostería de piedra rectangular (sillar)	6	0.090	2400	780	22
	8	0.120	3200	940	
Mampostería de ladrillo macizo con mortero de cal	2.4	0.060	1200	400	18
	4	0.090	1800	600	

Tabla 3. Valores establecidos en el Código de Construcción Italiano para diferentes tipologías de mampostería.

Buena calidad de mortero	1.5
Juntas horizontales delgadas	1.5 a
Conexiones transversales (cabeceras)	1.3
Mortero débil y / o núcleo interno de ancho	0.7
Inyecciones de lechada	1.5
Ferrocemento	1.5

Tabla 3. a) Valores complementarios para la obtención de datos mecánicos de mamposterías diferentes a los mostrados en la tabla 3.

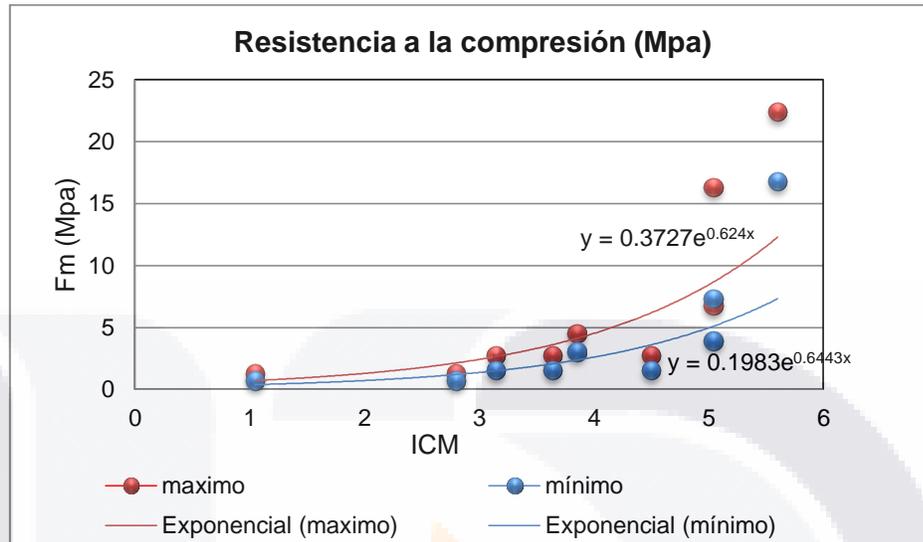


Figura 1. Gráfica de ICM vs Resistencia a la Compresión. Obtención de Ecuación de regresión exponencial para valores máximos y mínimos.

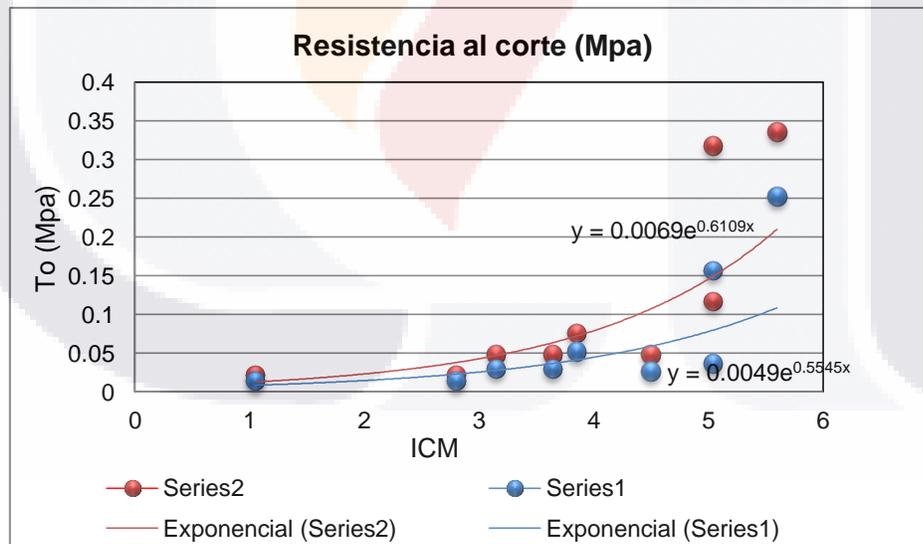


Figura 2. Gráfica de ICM vs Resistencia al corte. Obtención de Ecuación de regresión exponencial para valores máximos y mínimos.

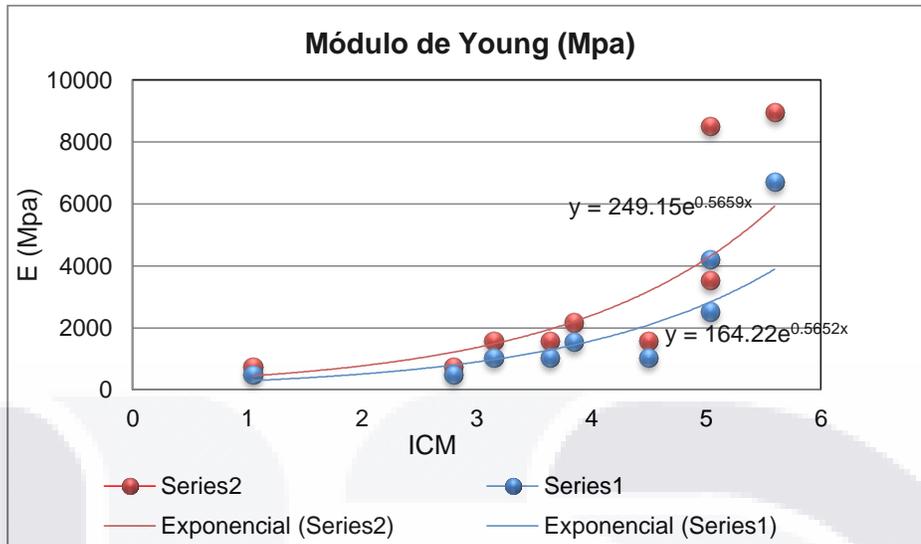


Figura 3. Gráfica de ICM vs Módulo de Young. Obtención de Ecuación de regresión exponencial para valores máximos y mínimos.

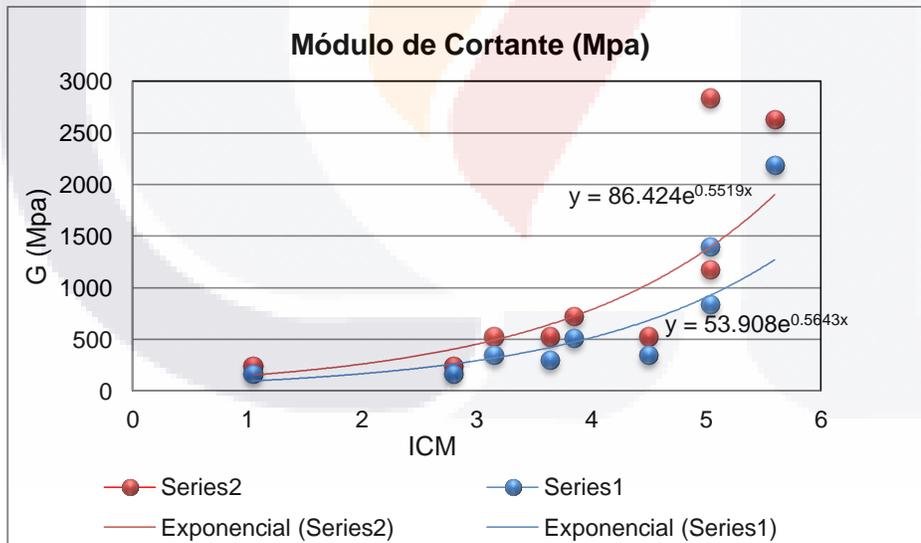


Figura 4. Gráfica de ICM vs Módulo de Cortante. Obtención de Ecuación de regresión exponencial para valores máximos y mínimos.

ANEXO B. EQUIPO Y COLABORADORES

La evaluación del patrimonio edificado además de implicar una gran cantidad de trabajo para obtener datos que representen las características y las condiciones reales del edificio, requiere de la intervención de una serie de especialistas que aporten en el análisis para el conocimiento a profundidad y con mayor precisión. Los especialistas que aportaron en la metodología desarrollada son los siguientes:

Historiador: En una primera etapa en el reconocimiento preliminar de la catedral se llevó a cabo una documentación histórica del patrimonio edificado en Aguascalientes y en particular la catedral de Aguascalientes. En esta etapa colaboró el Lic. en historia Christian Medina López Velarde funcionario e investigador del Centro INAH Aguascalientes, en la aportación de datos y sitios relevantes para la obtención de información relacionada con la Catedral, además de compartir su investigación enfocada en el templo de San Diego y uno de los principales libros de la historia de la catedral “La catedral y su Cabildo”, contribuyendo de forma importante en esta etapa.

Arquitecto: Participó la arquitecta Leonor Elena Meléndez de la Secretaria de Obras Públicas del municipio de Aguascalientes, quien está a cargo de los trabajos de conservación y mantenimiento de Catedral, en el reconocimiento de las condiciones actuales del edificio, así como en la aportación de estudios geofísicos con datos del subsuelo y los problemas de asentamiento que en la actualidad presenta la catedral.

Geólogo: El Dr. Rubén Alfonso López Doncel, Investigador del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis contribuyó en el análisis petrofísico y petrológico de la roca que constituye los muros de mampostería del templo, además de ayudar en el estudio de los patrones de deterioro de la piedra, así como las condiciones actuales.

Geofísico: El Dr. Jesús Pacheco Martínez investigador del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción quien lideró y colaboró en el área de los métodos geofísicos para la implementación y adecuación del método en el estudio del patrimonio edificado.

Además de los especialistas mencionados, se tomó en cuenta información de arqueólogos, restauradores y arquitectos relacionados con el tema de estudio.

ANEXO C. RESULTADOS PUBLICADOS

A) Artículos en revistas del JCR

Padilla-Ceniceros R., Pacheco-Martínez J., Lopez-Doncel R.A., Orenday-Tapia E.E., (2017), Deterioration of the building rocks on the masonry walls of the Basilic Cathedral of Aguascalientes, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (Aceptado, Mayo de 2017).

B) Artículos en memorias en congresos internacionales

Padilla-Ceniceros R., Pacheco-Martínez J. and López-Doncel R.A. (2016). Acquisition and analysis of petrophysical Properties of the rock of the masonry of the Cathedral of Aguascalientes, Mexico. Science and Art: A Future for Stone. Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone 6th to 10th September 2016, Paisley, Scotland, Volume I, Pags. (593-574) Edited by John J. Hughes and Torsten Howind.

C) Capítulos de libro

Padilla-Ceniceros, R., Sonnemann, T., y Pacheco-Martínez, J. (2015). “Reconocimiento de daños y patologías de zonas de difícil acceso de la catedral basilica de Aguascalientes mediante el UAV-Phantom II Vision Quadcopter”. Convergencias del diseño y de la construcción, A. Acosta Collazo, ed., Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. México, 370–386.

D) Presentaciones en Congresos nacionales e internacionales

Padilla-Ceniceros R., Pacheco-Martínez J. and López-Doncel R.A. (2016). Acquisition and analysis of petrophysical Properties of the rock of the masonry of the Cathedral of Aguascalientes, Mexico. Oral presentation of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone 6th to 10th September 2016, Paisley, Scotland.

Padilla-Ceniceros R., Pacheco-Martínez J., Hernández-Marín M., López-Doncel R.A. and Soto-Zamora M. (2016). Estudio de la respuesta eléctrica de mampostería para la caracterización constructiva interna de elementos estructurales de edificios patrimoniales. Presentación oral y presentación en cartel en el Foro Internacional del Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. Convergencias del Diseño y de la Construcción. Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo, FICAA_5, del 28 al 1 de Junio de 2016.

Padilla-Ceniceros R. and Pacheco-Martínez J. (2015). Caracterización y clasificación de los sistemas constructivos de mampostería de edificios históricos del estado de Aguascalientes. Presentación oral y presentación en cartel en el Foro Internacional del Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. Convergencias del Diseño y de la Construcción. Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo, FICAA_5, del 1 al 3 de Julio de 2015.

Padilla-Ceniceros R., Sonneman T., y Pacheco-Martínez J. (2014). Reconocimiento de daños y patologías de zonas de difícil alcance de la Catedral Basílica de Aguascalientes mediante el UAV-Phanton II vision quadcopter. Presentación oral y presentación en cartel en el Foro Internacional del Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. Convergencias del Diseño y de la Construcción. Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo FICAA_4, del 1 al 3 de Julio de 2014.

E) Trabajos en preparación:

Padilla-Ceniceros, R., Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., (2017) "Determination of the inner arrange of stones trough non-destructive testing by Electrical Resistivity Tomography (ERT) in heritage buildings". Artículo invitado en publicación especial del Environmental Earth Sciences a publicarse este año.

Orendain-Tapia, E.E., Pacheco-Martínez, J., Padilla-Ceniceros, R. (UAA), "In situ" and non-destructive characterization of mechanical properties of heritage masonry. Artículo invitado en publicación especial del Environmental Earth Sciences a publicarse este año.



