



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE
PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES
FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS”**

QUE PRESENTA

M.I.C. EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS, CON ÉNFASIS
EN INGENIERÍA CIVIL

TUTOR

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

COMITÉ TUTORAL

DR. MARCOS MAURICIO CHÁVEZ CANO

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ RUIZ

DR. RUBÉN ALFONSO LÓPEZ DONCEL

DRA. SILVIA RODRÍGUEZ NARCISO

AGUASCALIENTES, AGS., JULIO DE 2020

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

**DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **TUTOR** designado de la estudiante **EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA** con ID 972 quien realizó la tesis titulada **ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 17 de junio de 2020.



Dr. Jesús Páez Martínez
Tutor de Tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

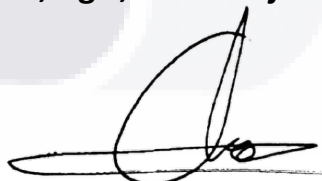
DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **COTUTOR** designado de la estudiante **EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA** con **ID 972** quien realizó la tesis titulada **ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 23 de junio de 2020.



Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano
Cotutor de Tesis

Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

**DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **COTUTOR** designado de la estudiante **EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA** con ID 972 quien realizó la tesis titulada **ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 23 de junio de 2020.

Dr. Guillermo Martínez Ruiz
Cotutor de Tesis

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

**DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **LECTOR** designado de la estudiante **EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA** con ID 972 quien realizó la tesis titulada **ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

A T E N T A M E N T E
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 23 de junio de 2020.



Dr. Rubén Alfonso López Doncel
Lector de Tesis
Instituto de Geología de la Universidad de San Luis Potosí

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

**DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **LECTORA** designada de la estudiante **EDITH ESTEFANÍA ORENDAY TAPIA** con ID 972 quien realizó la tesis titulada **ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 23 de junio de 2020.



Dra. Silvia Rodríguez Narciso
Lectora de Tesis
Universidad Autónoma de Aguascalientes

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aa: 23-jun-20

NOMBRE: Edith Estefanía Orenday Tapia

ID 972

PROGRAMA: Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos

LGAC (del
posgrado):

Ingeniería Civil

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis

() Trabajo práctico

TÍTULO: Estudio de la relación entre la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y las propiedades físicas de la mampostería de edificios históricos.

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Ofrece elementos para evaluar estructuras históricas

INDICAR SI/NO SEGÚN CORRESPONDA:

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:

- SI El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
- SI La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
- SI Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
- SI Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
- SI Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
- SI El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
- SI Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
- SI Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
- SI Cumpe con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)

El egresado cumple con lo siguiente:

- SI Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
- SI Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
- SI Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
- No se tiene
- indeterminado Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
- SI Coincide con el título y objetivo registrado
- SI Tiene congruencia con cuerpos académicos
- SI Tiene el CVU del Conacyt actualizado
- SI Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)

En caso de Tesis por artículos científicos publicados

- SI Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
- SI El estudiante es el primer autor
- SI El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
- SI En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
- SI Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
- SI La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado

Sí X
No

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

FIRMAS

Dr. Martín Hernández Marín

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dra. Leticia Jacqueline Robles Cuellar

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Alejandro Acosta Collazo

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. Héctor Homero Posada Ávila

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.



In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry

Orenday-Tapia Edith Estefanía¹ · Pacheco-Martínez Jesús¹ · Padilla-Ceniceros Raudel^{1,2} · López-Doncel Rubén Alfonso³

Received: 31 October 2017 / Accepted: 31 March 2018 / Published online: 7 April 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

The necessity of conserving and preserving the heritage is nowadays a developing study line for several researchers. From a civil engineering perspective, one of the most important issues for the conservation of historical buildings is to ensure the structural stability. For this purpose, it is necessary to determine the mechanical properties of the ancient construction materials. However, these structures cannot be evaluated by destructive tests due to politics and restrictions for preserving the heritage built. As a consequence, new methods that do not put in risk the integrity of the materials and the structure are becoming useful tools for researchers who work on structural engineering of heritage buildings. This paper presents a nondestructive method (NDM) that has been used to characterize the mechanical properties of different constructive systems of the San Antonio de Padua Temple, which is a religious icon in Aguascalientes, Mexico. This method includes the measuring of seismic waves' travel time in order to obtain shear and compressional velocity waves. Results show that with this method mechanical properties of masonry can be obtained such as Young's modulus, Poisson ratio and bulk density, which are needed for the structural analysis using numerical simulation models.

Keywords Nondestructive method · Masonry mechanical characterization · Cultural heritage · Temple of San Antonio de Padua

This article is part of a Topical Collection in Environmental Earth Sciences on “Stone in the Architectural Heritage: from quarry to monuments – environment, exploitation, properties and durability”, guest edited by Siegfried Siegesmund, Luís Sousa, and Rubén Alfonso López-Doncel.

✉ Pacheco-Martínez Jesús
jesus.pacheco@edu.uaa.mx

Orenday-Tapia Edith Estefanía
edith_89ot@hotmail.com

Padilla-Ceniceros Raudel
raudel.padilla@cegea.biz

López-Doncel Rubén Alfonso
rlopez@uaslp.mx

Introduction

Since pre-Columbian epoch, natural stones were the most used material for the constructions in Mexico due to their great availability and high resistance to weathering. After Spanish conquerors arrived to the current territory of Mexico, many buildings were erected using stone masonry as main material for structural and ornamental elements. Many of these buildings have been destroyed, but those still endured until nowadays are considered heritage buildings. Thus, their conservation is a collective concern involving several knowledge disciplines.

Conservation work of heritage buildings includes tasks on esthetical aspects, architectural issues and stability assessment. The main objective of a structural engineering study is to determine the level of safety of the studied building to support its own weight, and to assess its behavior against other extraordinary and more extreme effects as seismicity, vibrations or elimination (temporal or permanent) of structural elements. These studies include the mechanical characterization of the building materials; however, due to the

¹ Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, 20131 Aguascalientes, Ags, Mexico

² CeGeA SC – Consultores en Geociencias Aplicadas SC, Xochicalco 412, Lomas de Jesús María, 20925 Jesús María, Ags, Mexico

³ Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Av. Dr. Manuel Nava #5, Zona Universitaria, 78240 San Luis Potosí, S.L.P., Mexico

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por haberme aceptado en el programa. También quisiera agradecer a mi tutor, el Dr. Jesús Pacheco que ha sido un gran apoyo en la realización de esta tesis, gracias por la paciencia y por impulsarme a realizar el mejor trabajo posible. A mi co-tutor, el Dr. Marcos Chávez por la oportunidad y el apoyo para realizar una estancia en el Instituto de Ingeniería de la UNAM; fue una experiencia que disfruté y de la que saqué mucho provecho. También al Dr. Guillermo Martínez, al Dr. Rubén López y a la Dra. Silvia Rodríguez que me han aportado en la investigación que presento con valiosos comentarios que la han enriquecido, gracias por su tiempo.

Quiero agradecer principalmente y sobre todo a mi familia, a mis amigos y a Manuel por todo el apoyo que siempre me han brindado y por siempre ser una inspiración para crecer personal y profesionalmente. A mis compañeros y compañeras del doctorado, por la ayuda, la paciencia y la amistad que me brindaron. Así mismo, a todos mis profesores, por compartir su conocimiento y brindarme el tiempo y el apoyo que en algunas ocasiones necesité para obtener un buen resultado.

Y a CONACYT, por el apoyo económico brindado, ya que sin esto no hubiera sido posible el resultado que presento.

DEDICATORIAS

A mi familia, mi mamá, mi papá, Magaly y Chuy que son mi orgullo y base para siempre salir adelante en todo, gracias por estar presentes en cada paso.



ÍNDICE GENERAL

Introducción	8
CAPÍTULO I.- Intervenciones no destructivas para el diagnóstico de la salud estructural de dos templos de Aguascalientes, en México.....	11
Resumen	13
Palabras clave	13
Abstract	14
Keywords.....	14
Introducción: Contexto sociocultural	14
Primeros estudios	14
Metodología.....	16
La Catedral de Aguascalientes	16
Templo de San Antonio de Padua	17
Técnicas de Intervención no destructivas	18
Diagnóstico cualitativo de estructuras religiosas de Aguascalientes	18
Observación de Patologías.....	18
La fotogrametría como herramienta para el diagnóstico de un edificio patrimonial	19
Diagnóstico cuantitativo de edificios religiosos en Aguascalientes.....	20
Evaluación del deterioro de la mampostería.....	20
Caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería.....	20
Software aplicado al diagnóstico estructural de edificios históricos	22
Caracterización dinámica de edificios patrimoniales.....	22
Consideraciones finales y perspectivas	23
Agradecimientos.....	24
Referencias	24
Síntesis curricular de/los autor/es	26
CAPÍTULO II. In situ and Non destructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry.....	27
Abstract	29
Keywords.....	29
Introduction.....	29

Theory and methods.....	31
Case study.....	31
Results	32
Discussion of results.....	32
Conclusions	35
References	37

**CAPÍTULO III. Characterization of the mechanical properties of ancient masonry
from a non-destructive method in situ 39**

Abstract	41
Keywords.....	41
Introduction.....	42
Theory	43
Methodology	43
The case study: Temple of San Antonio de Padua	44
Application of the obtained results in a numerical model.....	46
Conclusion.....	47
References	48

**CAPÍTULO IV. Obtención del peso volumétrico de mampostería de edificios
históricos in situ y en laboratorio, a partir de la propagación de onda P 50**

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Characteristics of each CS of the Temple of San Antonio de Padua 34

Tabla 2. Calculated velocity waves 36

Tabla 3. Computed mechanical properties with the proposed approach..... 36

Tabla 1. Results of the mechanical properties of the characterization 46



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de los templos de la ciudad de Aguascalientes	15
Figura 2. Mapa de localización de la Catedral de Aguascalientes y del templo de san Antonio de Padua.....	16
Figura 3. Etapas de construcción de la Catedral de Aguascalientes sobre mapa sateital; vista de su entorno	16
Figura 4. Detalles arquitectónicos del Templo de San Antonio de Padua; planta arquitectónica, fachada principal, posterior y lateral	17
Figura 5. Fichas de levantamientos de daños del templo de San Antonio de Padua	19
Figura 6. Modelo tridimensional y planta de la Catedral de Aguascalientes, a partir de fotogrametría.....	20
Figura 7. Pruebas no destructivas realizadas a piedras de la Catedral de Aguascalientes	21
Figura 8. Generación y medición en campo de las ondas elásticas y su posterior análisis para la obtención de las propiedades mecánicas de los seis sistemas constructivos del templo de San Antonio de Padua.....	21
Figura 9. Velocidades de onda y propiedades mecánicas caracterizadas de seis sistemas constructivas del Templo de San Antonio.....	22
Figura 10. Análisis estructural a partir de modelos numéricos	23
Figura 1. Scheme of the linear arrangement of velocity sensor used to record P-wave and S-wave	32
Figura 2. Geophones in the field measurement; a) 14Hz horizontal geophone; b) Implemented geophones array over masonry elements	32
Figura 3. Example of produced seismograph in which arrival time of P-wave and S-wave can be identified	33
Figura 4. View of the constructive system characterized for this study.	33
Figura 5. Measurements taken to determine the stone masonry mechanical properties of the Temple of San Antonio de Padua by Vp and Vs assessment; a. on masonry basement wall; b. on masonry foundations	35

Figura 6. Comparison of Young's modulus of masonry Comparison of Young's modulus of masonry reported in the literature and determined in this study. (1) Disordered stone masonry (erratic and irregular stones); (2) masonry elaborated with stones coarsely cut; (3) masonry made with stones well overlapped each other; (4) soft stone block walls (tuff, calcarenite, etc.); (5) masonry walls elaborated with square stone blocks; (6) brick masonry walls with lime mortarView of the constructive system characterized for this study. 36

Figura 7. Comparison of bulk density of masonry reported in the literature and determined in this study. (1) Disordered stone masonry (erratic and irregular stones); (2) masonry elaborated with stones coarsely cut; (3) masonry made with stones well overlapped each other; (4) soft stone block walls (tuff, calcarenite, etc.); (5) masonry walls elaborated with square stone blocks; (6) brick masonry walls 37

Figura 8. Comparison of Poisson ratio of masonry reported in the literature and determined in this study: (1) compression tests along the direction orthogonal to the bed joints, according to BS EN 1052-1 (1999); (2) compression tests along the direction orthogonal to the bed joints, according to ASTM E111-17 (2017) 37

Figura 1. Scheme of the linear arrangement of the velocity sensors used to record P-wave and S-wave 44

Figura 2. Example of the identification of P-wave and S-wave in a produced seismograph 44

Figura 3. Location of the six constructive systems and the rocks of its masonry 45

Figura 4. Location of the characterized constructive systems of the building 46

Figura 5. (a) View of the Temple of San Antonio de Padua; (b) View of the topographic survey; (c) Localization of characterized constructive systems of the building; (d) Results of the shell stress analysis 47

RESUMEN

La conservación del patrimonio histórico edificado es un trabajo colectivo para varias disciplinas; desde el punto de vista de la estabilidad estructural, la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales es de vital importancia, ya que permite evaluar el grado de deterioro que poseen los materiales.

Sin embargo, en este tipo de edificios, la caracterización de las propiedades mecánicas por métodos tradicionales no es posible, ya que las pruebas destructivas o invasivas están restringidas en edificios patrimoniales con valor histórico. Por ello se vuelve necesario encontrar nuevas herramientas que permitan obtener información de manera no destructiva de estos edificios.

El objetivo de esta investigación fue determinar si el uso de los métodos sísmicos de la ingeniería geofísica, permiten obtener algunas propiedades mecánicas de la mampostería de manera confiable. Para ello se llevaron a cabo diversas pruebas, tanto *in situ* como en especímenes de laboratorio.

Se realizó así mismo, una investigación sobre la relevancia del uso de estos métodos, en el estudio de edificios patrimoniales. Se observó que en la ciudad de Aguascalientes se tiene especial interés en la conservación de los edificios históricos religiosos, por tal razón, en la Universidad Autónoma de Aguascalientes se han llevado a cabo estudios desde diversas perspectivas.

El documento se integra por tres artículos (dos publicados y uno en revisión), y un capítulo de libro publicado, donde se abordan resultados parciales de esta investigación.

PALABRAS CLAVE

Velocidad de onda, Propagación de ondas; método sísmico; Mampostería; NDT; Pruebas *in situ*; pruebas en laboratorio; Intervención; conservación; densidad.

ABSTRACT

The preservation of historical buildings is a collective work from several disciplines. From a structural stability view the determination of the physical and mechanical properties of the materials is essential, because it allows evaluating the level of damage of the materials.

However, in this type of buildings, the characterization of the mechanical properties using the traditional methods is not possible, because the destructive or invasive tests are restricted in historical heritage buildings. This is the reason why it is necessary to find new tools that allow obtaining information of the building without damaging it.

The objective of this research was to determine if the use of seismic methods of Geophysics Engineering allow obtaining several mechanical properties of the masonry, in a reliable way. For this reason, several tests were conducted *in situ* and in laboratory samples.

Also, a research of the importance of the use of these methods in heritage buildings was conducted in the city of Aguascalientes, because there is an especial on the preservation of historical religious buildings in this city. For this reason the Universidad Autónoma de Aguascalientes has directed several studies from different perspectives.

The document is formed by three articles (two already published and one in review), and one chapter of book published, where are presented partial results of this research.

KEY WORDS

Wave velocity, Propagation of the waves, Seismic Method, Masonry, NDT, Tests *In situ*, Tests in laboratory, Intervention, Preservation, Density

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la preservación del patrimonio edificado es una importante línea de investigación que, abarca varias disciplinas del conocimiento, como el histórico, estético, arquitectónico, y de ingeniería. Todas ellas trabajando con el objetivo de preservar el patrimonio histórico para generaciones futuras.

Por ello, desde el punto de vista de la ingeniería, el enfoque principal es determinar si un edificio posee estabilidad estructural que le permita mantenerse en pie, resistiendo así tanto su peso propio, como las fuerzas externas ocasionales y extraordinarias como el viento y los sismos. Actualmente existen avances en el análisis estructural que han permitido verificar la estabilidad por medios computacionales; sin embargo, para realizar un análisis confiable, es importante que los datos de entrada que se utilicen sean representativos de la estructura que se esté estudiando.

Desafortunadamente, la caracterización de estos datos es una tarea compleja por las restricciones que existen en los edificios históricos, en los que no se pueden hacer pruebas tradicionales, como extracciones de especímenes, por el valor histórico que ellos poseen. Por otro lado, el material con el que están contruidos, que en su mayoría es mampostería, es tan variado y heterogéneo que no existen valores estandarizados que puedan ser utilizados.

Ante estas dificultades, se hace necesario encontrar nuevos métodos que puedan utilizarse en la evaluación del patrimonio edificado, sin que estos causen daño en el edificio, pero que permitan obtener información del mismo. Existen ya varios métodos que permiten obtener información como el GPR, el ERT, termografía infrarroja, entre otros, llamados Pruebas No Destructivas (NDT por sus siglas en inglés) que son adaptaciones de otras áreas del conocimiento, que han permitido obtener información como la localización de vacíos, deterioro del material, anomalías, módulo de Young, entre otras.

Por lo tanto, este trabajo se ubica en la línea de investigación de las NDT, donde se utiliza un método que proviene de los estudios geofísicos. Este método utiliza la medición de la velocidad de ondas de cuerpo (P y S), como una herramienta para la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la mampostería.

Debido a que se optó por la titulación por artículos, a continuación, se presentan los documentos que se elaboraron y publicaron dentro de esta investigación.

El documento se conforma de tres artículos (dos publicados y uno en revisión) y un capítulo de libro ya publicado. El orden de los documentos no está de acuerdo a la fecha de su publicación, sino de los aspectos más generales como el estado del arte, la justificación y la importancia de los estudios; posteriormente, el primer estudio que se hizo utilizando este método en un templo de la ciudad de Aguascalientes, hasta una campaña experimental *in situ* y en laboratorio con el objetivo de validar el método.

El primero de ellos, titulado **Intervenciones no destructivas para el diagnóstico de la salud estructural de dos templos de Aguascalientes, en México** (paginas 85-98); fue publicado en la revista Intervención. Revista Internacional de Restauración, Conservación y Museología, de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía del Instituto Nacional de Antropología e Historia (ENCRyM-INAH), indexada en el índice CONACYT, en el año 2019. Los autores son Edith Estefanía Orenday Tapia, Evangelina Tapia Tovar y Jesús Pacheco Martínez. En el artículo mencionado, se habla sobre la importancia sociocultural de estudiar y conservar el patrimonio edificado, partiendo de una clasificación que se hace acerca de la información que se puede recolectar de los edificios. El artículo concluye con algunos ejemplos de los métodos que han surgido en estudios realizados en la Universidad Autónoma de Aguascalientes a partir de la clasificación propuesta.

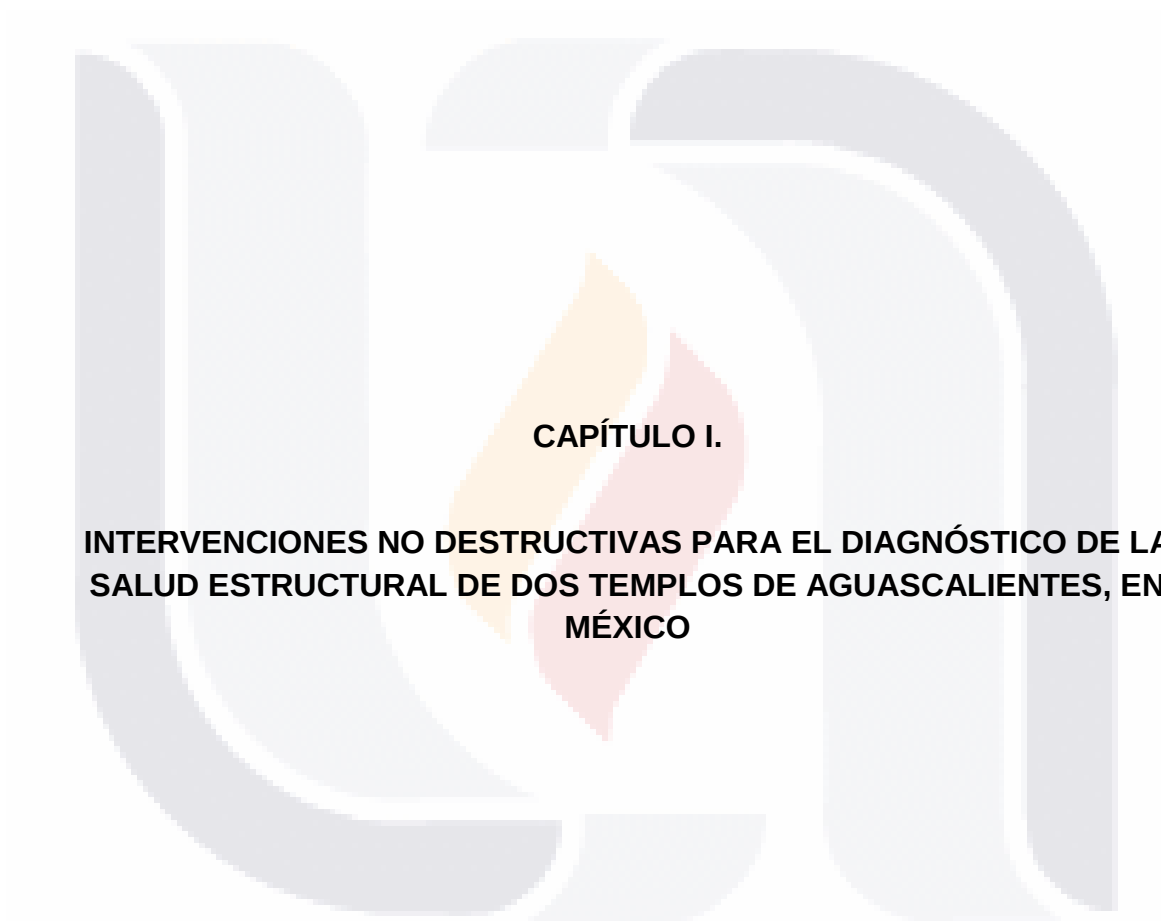
El segundo capítulo que conforma este documento, es el artículo ***In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry*** (páginas 286); fue publicado en la Revista *Environmental Earth Sciences* vol. 77, número 7, de *Springer*, indexada en JCR con un factor de impacto de 1.87, en el año 2018, cuyos autores son Edith Estefanía Orenday Tapia, Jesús Pacheco Martínez, Raudel Padilla Cenicerros y Rubén Alfonso López Doncel. En esta publicación se habla sobre un estudio realizado en el Templo de San Antonio de Padua, utilizando el método de la medición de la velocidad de la propagación de las ondas. Se clasificó al templo en seis sistemas constructivos, de acuerdo a la localización de los elementos estructurales y a la composición de sus rocas y morteros. En dicho artículo se presentan los resultados de una búsqueda documental para localizar valores de mampostería semejante a los estudiados y

utilizarlos como parámetros de comparación con las propiedades obtenidas a partir de este método.

El tercer capítulo, titulado ***Characterization of the Mechanical Properties of Ancient Masonry from a Non-destructive Method In Situ*** (paginas 370-378), se trata de un capítulo del libro *RILEM Bookseries. Structural Analysis of Historical Constructions*, de Springer, Cham, producto de la conferencia que se llevó a cabo en el 11th *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, llevado a cabo en Cusco, Perú (2018); sin embargo, la publicación salió en el 2019. Los autores de esta publicación son Edith Estefanía Orenday Tapia, Jesús Pacheco Martínez, Raudel Padilla Cenicerros, Héctor Ánimas Rivera, José Ángel Ortiz Lozano, Daniel Gaxiola Apodaca. En esta publicación se realizó una descripción del método de la medición de la propagación de las velocidades de onda en un edificio patrimonial (Templo de San Antonio) y el uso de estos parámetros, para usarse como datos de entrada en un modelo numérico.

Por último, el cuarto capítulo, titulado **Relation between the velocity propagation of seismic wave (Vp) and density of historical masonry**, el cual fue enviado a la revista *Construction and Building Materials* de Elsevier, indexada en JCR con un factor de impacto de 4.046, y que actualmente se encuentra en proceso de revisión. Los autores de esta publicación son Edith Estefanía Orenday Tapia, Marcos Mauricio Chávez Cano, Jesús Pacheco Martínez, Silvia Rodríguez Narciso, Guillermo Martínez Ruiz, Rubén Alfonso López Doncel y Raudel Padilla Cenicerros. El artículo aborda una campaña experimental llevada a cabo tanto *in situ* como en especímenes de laboratorio, donde se busca determinar si existe una relación directa entre la velocidad de onda P (Vp) y la densidad de la mampostería. Adicionalmente, se propone un modelo estadístico que permite obtener, de manera más precisa, la propiedad que se está buscando.

Para finalizar, se presentarán algunas conclusiones generales.

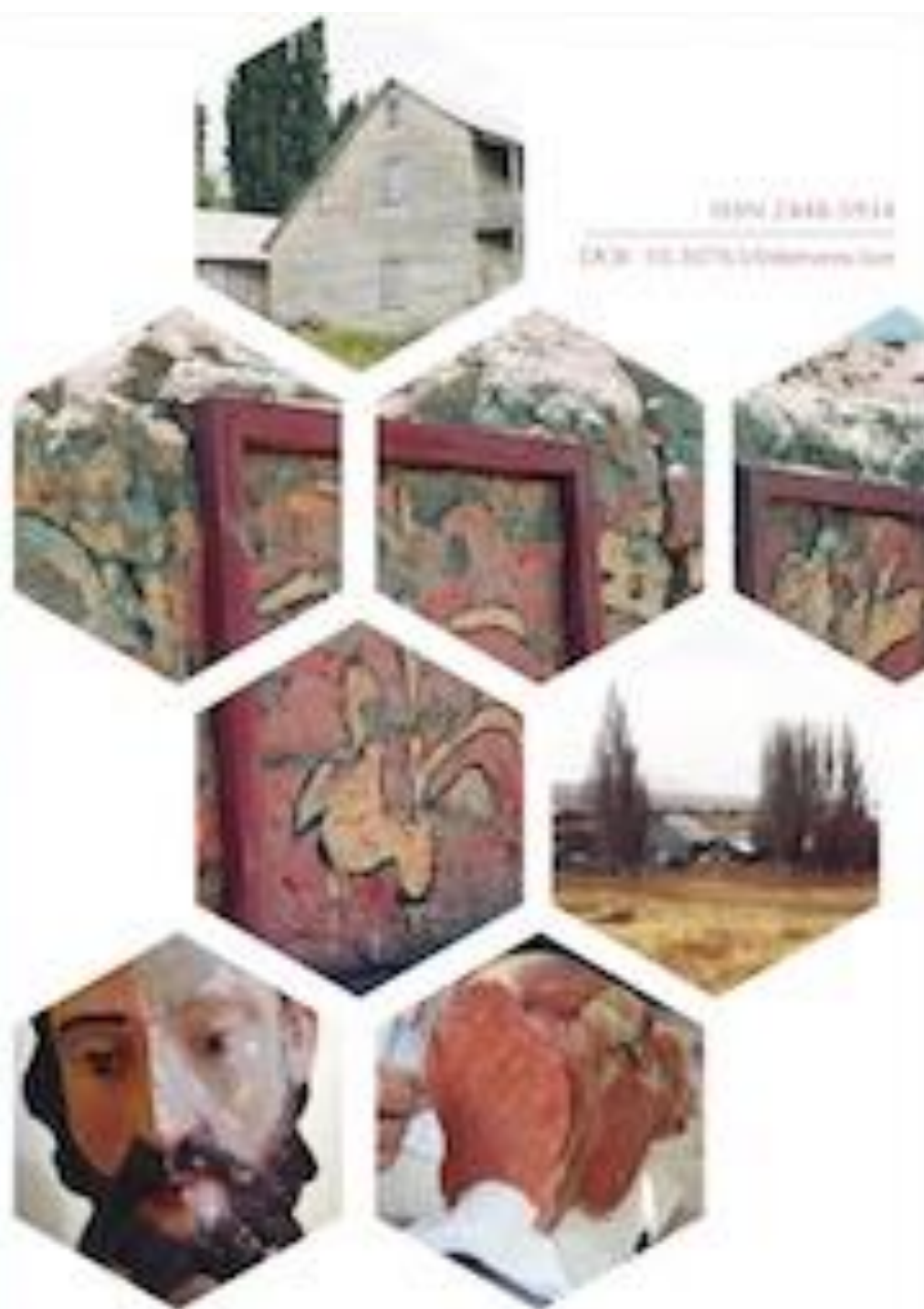


CAPÍTULO I.

INTERVENCIONES NO DESTRUCTIVAS PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE DOS TEMPLOS DE AGUASCALIENTES, EN MÉXICO

Intervención

Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología



ISSN 2344-5914
CA 30 - 10.30763/intervencion.com



Instituto Nacional de Conservación, Restauración y Museología
Año 10, No. 38 • Enero-junio de 2019



Intervenciones no destructivas para el diagnóstico de la salud estructural de dos templos de Aguascalientes, en México

Non-Destructive Interventions for the Diagnosis of the Structural Condition
of Two Temples in Aguascalientes, Mexico

Edith Estefanía Orenday Tapia

Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos,
Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México
eeorenday@gmail.com

Evangelina Tapia Tovar

Departamento de Sociología y Antropología,
Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México
etapia@correo.uaa.mx

Jesús Pacheco Martínez

Departamento de Construcción y Estructuras,
Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México
jesus.pacheco@edu.uaa.mx

Resumen

Este INFORME presenta los trabajos —algunos en proceso y otros concluidos— del grupo de investigación de Ingeniería Estructural de Edificios Patrimoniales (IEEP) de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Uno de los criterios para incluirlos fue que estuvieran orientados a diagnosticar la salud estructural de templos católicos del Centro Histórico de Aguascalientes, a partir de métodos no destructivos. El INFORME se enfoca en el análisis del templo de San Antonio de Padua y de la Catedral de Aguascalientes, tanto por su relevancia arquitectónica como por ser culturalmente icónica. Entre sus resultados destaca la importancia de utilizar este tipo de intervención en edificios de valor patrimonial con el fin de preservar no sólo su arquitectura sino también su valor sociocultural y religioso.

Palabras clave

patrimonio religioso; métodos no destructivos; diagnóstico estructural; Aguascalientes; México

Abstract

This REPORT presents both the works in progress and those completed by the research group of Structural Engineering of Heritage Buildings (IEEP for its acronym in Spanish) of the Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). One of the criteria in the decision to incorporate them was their orientation to diagnose the structural condition of Catholic temples in the Historic Center of Aguascalientes using non-destructive methods. The REPORT focuses on the analysis of the temple of San Antonio de Padua and the Cathedral of Aguascalientes, due to its architectural relevance and for being culturally iconic. The results highlight the importance of using this type of intervention in buildings that have heritage value in order to preserve not only their architecture but also their socio-cultural and religious value.

Keywords

Religious heritage; non-destructive methods; structural diagnosis; Aguascalientes, Mexico

Introducción: contexto sociocultural

Los templos católicos son un pilar del patrimonio cultural de Aguascalientes, tanto por su importancia arquitectónica como por su significado cultural; el valor que esas edificaciones tiene para sus habitantes se engrandece al ser un símbolo de religiosidad que les da sentido de pertenencia.

El estado de Aguascalientes se localiza en la parte central de México, en una zona caracterizada por su arraigada religiosidad católica. Es considerado “parte del llamado bastión católico más tradicional” (Patiño y Zalpa 2014: 63).

Aunque se reconoce que durante los tres últimos decenios se ha dado una reducción de la población católica en Aguascalientes, según datos censales se observa que más de 90% de sus pobladores se declara católico (Inegi 2010); la Encuesta de Prácticas y Creencias Religiosas, aplicada en Aguascalientes en 2009, señala que casi 77% de los habitantes de la entidad acude a los templos católicos por lo menos una vez al mes (Patiño y Zalpa 2014).

La arquitectura que se observa en el Centro Histórico de Aguascalientes y en zonas cercanas a éste (Figura 1) es muestra de la importancia de la religión católica en la constitución de la cultura y en la identidad del agascalentense.

El patrimonio cultural “es una pertenencia, que tal vez pueda ser objetiva, pero ineludiblemente se trata de una apropiación simbólica [...] está relacionada con bienes valiosos —tangibles o intangibles— que deben ser conservados para seguir perteneciendo al grupo en cuestión” (Martínez 2016: 13).

Órdenes religiosos como las de los dieguinos, franciscanos, juaninos, mercedarios y dominicos llegaron a la

ciudad y sentaron las bases culturales que su población aún conserva.

Primeros estudios

Dada la importancia de los templos católicos en la ciudad, se han efectuado estudios y trabajos para preservar la cultura religiosa (Gutiérrez 2003, 2006, 2007a y 2007b; Imdosoc 2015; Muñoz 1996; Zalpa 2003 y 2014). Desde el Ayuntamiento de Aguascalientes se promueven recorridos turísticos por el centro de la ciudad que incluyen, por su belleza arquitectónica, los templos católicos. De igual manera, en los espacios universitarios dedicados a la investigación sociocultural, se llevan a cabo investigaciones para conocer el sentido social que la religión católica asume entre la población del estado (Gutiérrez 2007a; Padilla 2013 y 2009; Patiño 2013; Patiño y Tapia 2009; Patiño y Zalpa 2014; Tapia 2011; Zalpa 2003 y 2013; Padilla 2013).

Ese interés académico también está presente en la arquitectura y la ingeniería; los trabajos al respecto han permitido evaluar los edificios procurando preservar sus valores físicos, arquitectónicos y culturales, sentando así las bases para la preservación estructural y constructiva de los templos. En el viejo continente, desde hace varias décadas, estudios sobre la preservación de edificios históricos han interesado a muchos investigadores. Entre las más importantes asociaciones encargadas de velar por la conservación del patrimonio cultural a escala internacional están la UNESCO y el International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), mientras que en el ámbito nacional el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) tiene como objeto investigar, conservar y difundir el patrimonio arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de la nación con el fin de fortalecer la identidad y la memoria de la sociedad que lo posee (INAH 2018), y existe también la Dirección General de Sitios y Monumentos.

Sin embargo, están surgiendo nuevas líneas de especialización, centradas en los edificios patrimoniales desde el punto de vista de la ingeniería (SAHC 2019). Los primeros estudios de este tipo que se realizaron a escala nacional, fueron en 1989, cuando la Catedral Metropolitana mostró signos de daño grave (una grieta de tamaño considerable) ocasionado por los hundimientos de la zona; se requería, entonces, una valoración urgente para determinar la estabilidad del edificio. Se formó un comité de expertos de áreas como geotecnia, estructuras y materiales, del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) y de la Facultad de Arquitectura (FA) de la misma institución, dirigido por el arquitecto Sergio Saldívar. Dicho comité llegó a la conclusión de que el hundimiento era causado por dos factores: el tipo de suelo deformable en el que se encuentra construido (arcillas lacustres) y por razón de que está situado sobre antiguos templos mexicas, que ocasionaban un hundimiento diferencial y éste, a su



FIGURA 1. Mapa de los templos más antiguos de la ciudad de Aguascalientes (Fotografías: Edith Orenday-Tapia, 2019; mapa: Google Earth®, 2018).

vez, un agrietamiento de los elementos estructurales de la catedral (Aguilera Jiménez 2013); esos hallazgos permitieron conocer la importancia que el “efecto sitio” tiene sobre una estructura y la necesidad de ésta de ser evaluada y monitoreada para su preservación.

Recientemente, en la UAA se han comenzado a realizar estudios para el diagnóstico de edificios patrimoniales desde la perspectiva de la ingeniería. Es en ese contexto como este artículo presenta una descripción de las investigaciones emprendidas por la universidad sobre los estudios de recintos religiosos desde la perspectiva de la ingeniería estructural (Ánimas 2015; Ánimas, Navarro, Pacheco, García, Arroyo, Cordero y Esparza 2013; Ánimas, Pacheco y Ortiz 2014; Navarro 2013; Orenday-Tapia, Pacheco-Martínez, Padilla-Ceniceros, Ánimas-Rivera, Ortiz-Lozano y Gaxiola Apodaca 2019; Orenday-Tapia, Pacheco-Martínez, Padilla-Ceniceros y López-Doncel, 2018; Orenday 2016; Padilla, Pacheco, López y Orenday 2017; Padilla, Sonnemann y Pacheco 2015).

Peña (2008) menciona que una estructura histórica posee dos tipos de valores: los intrínsecos y los físicos. Los valores intrínsecos son aquellos inherentes a la estructura, pero no de manera tangible, como la arquitectura del edificio (estilo arquitectónico, espacio, distribución, uso), el valor artístico (murales, muebles, frescos), el histórico (época de construcción, sucesos acontecidos en ésta), el valor de la ingeniería (técnicas de construcción y materiales usados, que dejan un legado de las capacidades de los constructores de la época) y el valor económico (turismo, atracción).

Este trabajo se propone agregar a los valores intrínsecos de las estructuras el valor sociocultural. En cuanto a los edificios religiosos, éste se refiere a la identidad religiosa, por lo que, en el caso de la ciudad de Aguascalientes, es ese valor adicional que los hidrocálidos le dan a los edificios de culto.

El objetivo principal de una intervención debe ser salvaguardar los valores físicos e intrínsecos de una estructura (Peña 2008), es decir, preservar el edificio sin dañarlo

físicamente y protegiendo, en la medida de lo posible, todos esos aspectos que le dan valor, siguiendo la teoría de la mínima intervención del edificio como primer criterio de conservación (De Solà-Morales, 2015).

Metodología

En la evaluación de los dos templos se optó por utilizar técnicas que fueran no destructivas; por ello, se excluyeron todos aquellos estudios que emplearon técnicas destructivas, o que se realizaron en otros edificios religiosos.

Para la elección de los estudios que aquí se presentan, se hizo una investigación documental de los trabajos de diagnóstico y de evaluación hechos por el grupo de investigación de Ingeniería Estructural de Edificios Patrimoniales (IEEP) de la UAA, del que formamos parte, referidos a dos de los edificios religiosos más importantes y bellos de la ciudad: el templo de San Antonio de Padua y la Catedral de Aguascalientes, cuya localización se muestra en la Figura 2.

La Catedral de Aguascalientes

Desde su construcción fue referencia para la traza de la ciudad, porque forma parte de la plaza de armas de Aguascalientes, junto con el palacio municipal y el palacio de gobierno del Estado (Figura 2A). En una primera etapa

(1621), se construyó la nave central a base de mampostería en bruto. En la Figura 3 se muestran las diferentes etapas de construcción en planta que Padilla (2017) identificó:

La construcción del edificio actual inició en 1704 con el cura Antonio Flores de Acevedo y concluyó en 1738 con el párroco Manuel Colón de Larreategui. Su fachada está conformada por tres cuerpos con un retablo en

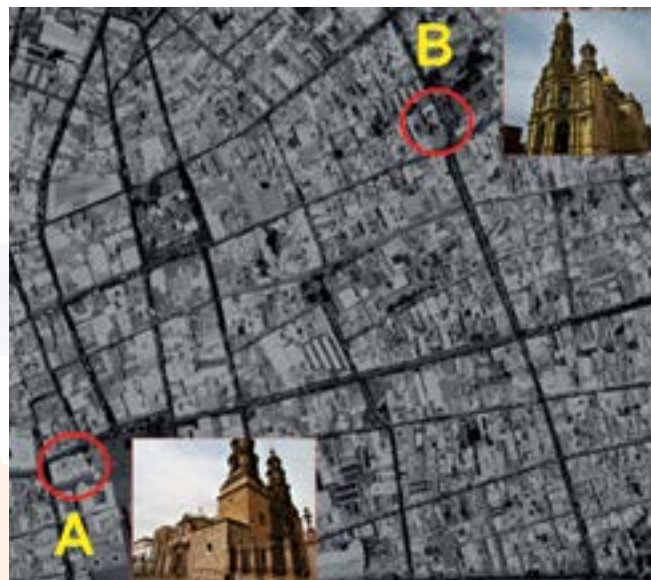
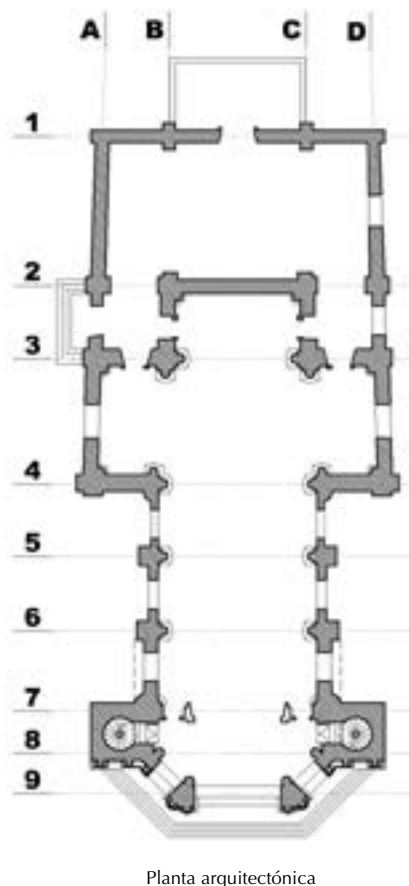


FIGURA 2. Mapa de localización de la Catedral de Aguascalientes y del templo de San Antonio de Padua (Fotografías: Edith Orenday-Tapia, 2019; mapa: Google Earth®, 2018).



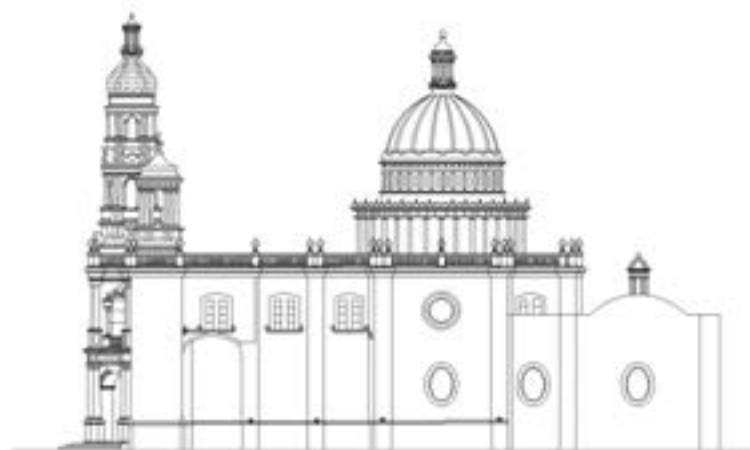
FIGURA 3. Etapas de construcción de la Catedral de Aguascalientes sobre mapa satelital; vista de su entorno (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuente: R. Padilla 2017; mapa: Google Earth®, 2018).



Fachada principal



Fachada posterior



Fachada lateral derecha

FIGURA 4. Detalles arquitectónicos del templo de San Antonio de Padua; planta arquitectónica, fachada principal, posterior y lateral (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuente: M. Navarro 2013).

estilo barroco salomónico terminado en forma clásica de trapezio; el cuerpo central posee un par de columnas a cada lado de la puerta principal, las cuales enmarcan las estatuas de cantería. Se ingresa al recinto a partir de un arco de medio punto, adornado con guirnaldas y rosetones labrados. Posee, además, dos torres, una a cada lado; la primera de ellas se construyó en 1764 y la segunda en 1946 (Corpus 1969).

La nave central mide 58.40 m de largo y 27.30 m de ancho, y las naves laterales tienen un promedio de 30.00 m de largo y 6.80 m de ancho. La cúpula principal, que se ubica en la parte central del templo, está compuesta por seis lados. La capilla de Lourdes y la zona de criptas se localizan a los costados de la fachada (Padilla 2017).

A pesar de que el edificio se ha intervenido a lo largo de su vida, en 2012 comenzó a mostrar daños:

ocasionado por asentamientos generados por movimientos en el subsuelo debido a causas de la humedad y presencia

de oquedades (criptas) [...] Los principales problemas estructurales generados por los asentamientos son: generación de grietas [...] 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 [Padilla 2017: 35].

Templo de San Antonio de Padua

Ubicado en el centro de la ciudad de Aguascalientes (Figura 2B), es de estilo ecléctico: neorrenacentista, neobarroco, neogótico, neoclásico, árabe, ruso, entre otros (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010). Fue erigido entre los 1895 y 1908, diseñado y construido por el zacatecano autodidacta Refugio Reyes (Reyes 2013).

La planta tiene forma de cruz latina (Figura 4), con un nártex en donde se localiza el coro; mide 38.81 m

de largo por 21.25 m de ancho, dejando de lado la capilla de Santa Rita de Casia, que se encuentra en la parte posterior del templo (Saldívar 2015). El sistema constructivo es a base de muros de carga de mampostería, con arcos de medio punto y columnas (Villegas 1974). Los muros de carga son de mampostería elaborada principalmente con sillar de matabacán (un limo arcilloso pobremente litificado), unido con mortero de arena y cal apagada.

“De la construcción sobresale su fachada, la cual es de sillar de cantera de tres colores (verde, amarilla y rosa)” (Navarro 2013: 22), la cual es simétrica, compuesta por dos cuerpos horizontales coronados por tres torres, una principal al centro y más alta que las demás y dos torrecillas laterales secundarias.

La cúpula está formada a partir de un sistema estructural mixto, que combina la piedra de cantera con una serie de anillos metálicos hechos a base de rieles; compuesta por dos cuerpos, el primero formado por un tambor sin muros, sostenido por una fila triple de columnas dóricas concéntricas separadas; en el segundo cuerpo con un pretil ondulado en el eje de las columnas. Posteriormente se encuentra la cubierta peraltada y, por último, la alargada linternilla (Villegas 1974). Las cubiertas están formadas por bóvedas de crucería, de viga y bóveda de ladrillo (Navarro 2013), cuyas nervaduras terminan unidas por un anillo del mismo grosor que enmarca el rosetón de donde salen las lámparas (Villegas 1974).

No se sabe con certeza cuántas intervenciones ha sufrido el templo, sin embargo, se destacan algunas, como la construcción de criptas subterráneas que conectan la capilla de Santa Rita con la sacristía y la colocación de vigas metálicas en el nártex del acceso principal. Además, en 2008 se realizaron trabajos de limpieza de la cantera, inyección de grietas, reintegración de piezas faltantes de los elementos ornamentales, consolidación de piezas deterioradas y reintegración de color en la cúpula y las torres (Navarro 2013).

Técnicas de intervención no destructivas

Cuando se habla de intervenir un edificio histórico, la connotación es la recuperación respetuosa del patrimonio, que requiere especialistas en la materia para la elaboración de proyectos, las investigaciones pertinentes y los análisis necesarios, la dirección y supervisión de la obra, con el fin de lograr que las propuestas en el proyecto se apliquen de manera correcta (Terán 2004). Sin embargo, para intervenir un edificio histórico desde una perspectiva integral, protegiendo tanto los valores físicos como intrínsecos, es necesario tener un “entendimiento total” de aquél (Peña, 2008). Por lo tanto, para efectuar la intervención —una restauración, rehabilitación o consolidación— de un edificio patrimonial, es necesario primero realizar su diagnóstico y evaluación. Según Peña

(2008), tales diagnósticos y evaluaciones se dividen en cualitativos y cuantitativos.

Diagnóstico cualitativo de estructuras religiosas de Aguascalientes

Los diagnósticos cualitativos corresponden a la información que se obtiene de la estructura, la que generará datos sobre sus materiales, sistemas constructivos, historia, entre otros. Los trabajos se orientan hacia la observación del daño estructural, la degradación de los materiales y la investigación histórica de éstos.

Algunos resultados obtenidos de los diagnósticos cualitativos son la identificación de los elementos con daño de la estructura que deberán intervenir, el análisis de información documental —o de informantes clave— sobre el sistema constructivo de un edificio, la ubicación del banco de material de donde se extrajeron las piedras con las que se levantó la construcción, entre otros. Dentro de los métodos cualitativos que se han utilizado en la UAA, se identificaron tanto la observación de patologías como el uso de la fotogrametría para la creación de modelos tridimensionales de los edificios.

Observación de patologías

La patología constructiva es la “ciencia que estudia los problemas constructivos que aparecen en el edificio o [en alguna de sus unidades] después de su ejecución” (Cedeño 2008: 73). En otras palabras, estudia el daño que existe en una estructura, ya sea que aparezca a pocos meses de su ejecución o después de varios años, pudiendo ser ocasionados por el deterioro normal del tiempo o la intemperie, por algún desastre natural, como sismos o fallas geológicas, o por una causa antropogénica.

En 2013, Navarro realizó un levantamiento de los daños del templo de San Antonio. Entre los hallazgos identificó la existencia de algunas lesiones físicas y mecánicas en distintas partes del edificio, como fisuras, humedades y piezas faltantes. Con base en la información obtenida se realizaron fichas técnicas como las que se muestran en la Figura 5, donde se registró la ubicación del daño, una fotografía y una descripción de cada uno de los elementos deteriorados.

No se sabe si las fisuras reportadas en el levantamiento se debieron a la remodelación que se hizo en las calles aledañas al templo o si, en cambio, ya existían en el edificio y se descubrieron gracias a las obras que se hicieron en la zona.

Otro estudio importante dentro de este tipo de métodos es el acopio de información histórica, de tal forma que, en la medida de lo posible, se conozcan los procesos constructivos, las etapas de construcción, la procedencia de los materiales utilizados en la construcción,

LEVANTAMIENTO DE DAÑOS		LEVANTAMIENTO DE DAÑOS		LEVANTAMIENTO DE DAÑOS	
FECHA: MAYO 2013		FECHA: MAYO 2013		FECHA: MAYO 2013	
NÚM. DE FICHA DE VALORACIÓN: 17		NÚM. DE FICHA DE VALORACIÓN: 17		NÚM. DE FICHA DE VALORACIÓN: 17	
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTO: INTERIOR CUBIERTA		DESCRIPCIÓN DE ELEMENTO: MURO EXTERIOR FACHADA PRINCIPAL, PTE.		DESCRIPCIÓN DE ELEMENTO: INTERIOR CUBIERTA	
LOCALIZACIÓN EN PLANTA	FOTOGRAFÍA	LOCALIZACIÓN EN PLANTA	FOTOGRAFÍA	LOCALIZACIÓN EN PLANTA	FOTOGRAFÍA
LOCALIZACIÓN EN ALZADO		LOCALIZACIÓN EN ALZADO		LOCALIZACIÓN EN ALZADO	
DESCRIPCIÓN DE PATOLOGÍA		DESCRIPCIÓN DE PATOLOGÍA		DESCRIPCIÓN DE PATOLOGÍA	
OBSERVACIONES		OBSERVACIONES		OBSERVACIONES	
1. Marcas de humedad por condensación en la pared del primer tramo de la cubierta. 2. Pequenas fisuras que pueden ser por humedad en la pared del primer tramo. 3. Grietas probablemente por expansión de juntas, en conjunto a todo alrededor de la cubierta. 4. Desprendimiento de acabados por humedad. 5. Grietas en ambos lados de las columnas de la cubierta, estas aparecen en casi todas las columnas. 6. Grietas y escamoteo de pintura debida a la humedad por flechazo recurrente en todas las nervaduras en capite.		1. Grietas horizontales en parte superior a altura de ventana de coro. 2. La piedra clave de arco de acceso en nubes se desdobló hacia abajo, ya fue reparado. 3. Flecha en columna.		1. Marcas de humedad por condensación en la pared del primer tramo de la cubierta. 2. Pequenas fisuras que pueden ser por humedad en la pared del primer tramo. 3. Grietas probablemente por expansión de juntas, en conjunto a todo alrededor de la cubierta. 4. Desprendimiento de acabados por humedad. 5. Grietas en ambos lados de las columnas de la cubierta, estas aparecen en casi todas las columnas. 6. Grietas y escamoteo de pintura debida a la humedad por flechazo recurrente en todas las nervaduras en capite.	
La humedad se encuentra controlada actualmente.		La humedad se encuentra controlada actualmente.		La humedad se encuentra controlada actualmente.	

FIGURA 5. Fichas de levantamiento de daños del templo de San Antonio de Padua (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuente: M. Navarro 2013).

las intervenciones realizadas en el inmueble, entre otros, ya que el patrimonio cultural está íntimamente ligado a la memoria colectiva y a los productos tangibles, que son una verificación objetiva de las huellas del pasado.

El acopio de información histórica constituyó un apartado importante en los trabajos del estudio de la Catedral de Aguascalientes (Padilla 2017) y del templo de San Antonio (Navarro 2013; Orenday 2016), presentados previamente. Éstos sirvieron de base para identificar el tipo de materiales utilizados en los edificios, sus edades, la ubicación de la que se extrajeron las canteras con las que se construyeron y, así, por un lado, dirigir los estudios que debían realizarse y, por el otro, interpretar sus resultados.

La fotogrametría como herramienta para el diagnóstico de un edificio patrimonial

La fotogrametría es una técnica que utiliza la fotografía para definir con precisión la forma, las dimensiones y la posición de un objeto cualquiera. Entre las ventajas que ofrece este método incipiente están la representación digital completa de cualquier objeto y la obtención objetiva, instantánea, cómoda y económica de la información (Castro 2016); por sus ventajas, los investigadores lo han empleado para obtener modelos en 2D y en 3D de zonas arqueológicas (Bryan y Chandler 2008) y para el estudio de edificios patrimoniales en la ciudad de Aguascalientes.

“La virtualización del patrimonio edificado por medio de técnicas fotogramétricas y modelado en 3D representa una importante alternativa en el estudio del patrimonio edificado. Aporta una visión global del inmueble y

muestra detalles importantes en zonas de difícil acceso” (Padilla *et al.* 2015: 373). Esta técnica permite obtener la disposición, las medidas y las formas de los elementos desde una perspectiva global o local: su metodología consta de la obtención de información (por fotogrametría terrestre y aérea, escáner láser terrestre y aéreo y el vehículo aéreo no tripulado, esto es, dron), el procesamiento de aquella y de los resultados (modelo).

Padilla *et al.* (2015) utilizaron la fotogrametría para modelar en 3D la Catedral de Aguascalientes y determinar si, a partir de este método, se podrían identificar de manera precisa las características geométricas y físicas del edificio. Para la elaboración del modelo se tomaron las fotografías a partir del uso de drones para visualizar zonas de difícil acceso (vuelos a 40 m de altura, aproximadamente) y de fotografías obtenidas de forma manual, con lo que se recopilaban 1 500 imágenes (Padilla 2017). Sin embargo, debido a la complejidad del edificio, el modelo no se logró completar en su totalidad (aproximadamente 80% del edificio), pero se modelaron aspectos importantes de la geometría de la construcción y datos de sus condiciones actuales. En la Figura 6 se observa el modelo del levantamiento de la Catedral de Aguascalientes mediante fotogrametría. Una vez realizado, se identificaron algunas patologías en el edificio, como agrietamientos, desprendimiento de elementos y daños ocasionados por intemperismo.

No obstante que el modelo no se completó, el estudio significa un avance importante en la aplicación de la fotogrametría a gran escala para evaluar edificios patrimoniales desde una perspectiva global y local: permite conocer características geométricas y contar con un modelo vectorizado que puede exportarse rápidamente a

programas de análisis numérico y conseguir información sobre el estado estructural del edificio.

Diagnóstico cuantitativo de edificios religiosos en Aguascalientes

Los métodos no destructivos —también conocidos como *no invasivos* o *non-destructive test* (NDT)— se han empleado para diagnosticar edificios que, sin daño físico aparente, demandan que se conozca su condición estructural; también en aquellos en los que existen signos de deterioro, como agrietamientos, fisuras, desprendimiento de materiales, por mencionar algunos, cuya estabilidad estructural es necesario determinar.

Los NDT pueden aplicarse a los materiales o a la estructura para obtener información sobre su forma (configuración interna o externa), condición o propiedades físicas sin causar daño a ninguna de sus partes (Vekey 1988). Aunque varios de estos métodos se han desarrollado específicamente para el diagnóstico de la mampostería, algunos corresponden a otras áreas del conocimiento, como la arqueología, la aeroespacial, la geofísica u otras aplicaciones (Harvey Jr. y Schuller 2010; Schuller 2006), y se han adaptado para las condiciones que presentan las edificaciones de mampostería. Cuatro métodos se han empleado en los templos antes mencionados de la ciudad de Aguascalientes: la evaluación del deterioro de la mampostería, la caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería, el uso de *software* para el análisis estructural y la caracterización dinámica.

Evaluación del deterioro de la mampostería

Padilla *et al.* (2017) ejecutaron una investigación en la Catedral de Aguascalientes, donde se realizaron estudios petrológicos (difractometría de rayos X) y petrofísicos (porosidad, densidad y densidad aparente) en piedras de mampostería del templo tomadas de anteriores trabajos de restauración así como el levantamiento de daños en las piedras de la mampostería y la clasificación de los tipos de roca utilizados para elaborar los muros, como lo muestra la Figura 7.

Se identificaron los diferentes tipos de piedra de los que estaba constituido el edificio para, más adelante, realizar pruebas de laboratorio *in situ*, como de Karsten, captación de agua, distribución de radios de poro y cristalización de sales. Con los resultados obtenidos se identificó el tipo de piedra más propenso a deteriorarse, el mecanismo de deterioro y los factores que lo aceleran.

Los resultados de Padilla *et al.* (2017) mostraron que la mampostería de la catedral fue elaborada usando fragmentos de rocas volcánicas ácidas (riolitas-ignimbritas), diferenciándose tres tipos de acuerdo con la zona de donde se extrajeron: toba Barranca, toba Valladolid

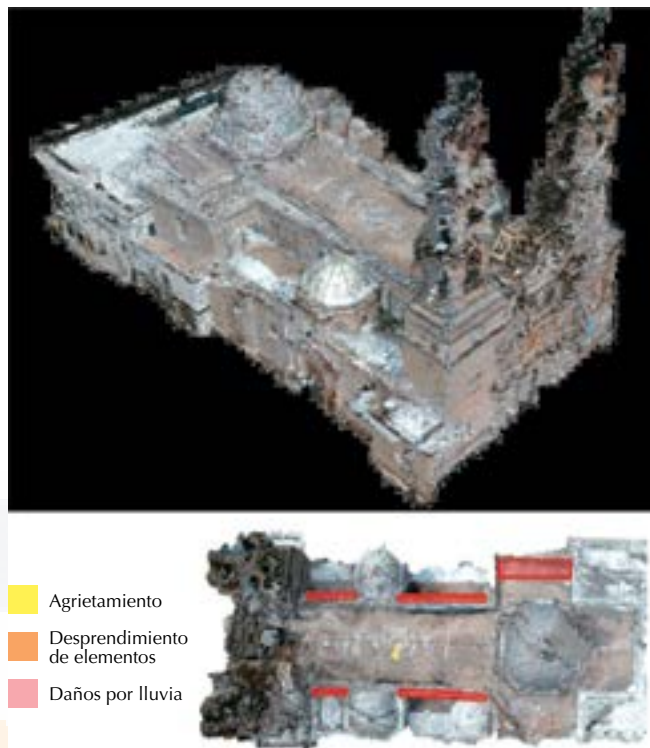


FIGURA 6. Modelo tridimensional y planta de la Catedral de Aguascalientes a partir de fotogrametría (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuente: R. Padilla *et al.* 2015).

y toba San Miguel el Alto. La mampostería original fue construida con fragmentos de roca de la toba Barranca; la toba Valladolid se usó durante la restauración de la catedral en la década de 1970, y la toba de San Miguel el Alto se empleó para la restauración más reciente, de 2014. Padilla *et al.* (2017) concluyeron que la toba de la mampostería de la catedral está expuesta a un proceso de degradación por efecto de la cristalización de sales, favorecida por la humedad, principalmente, en la parte baja de los muros del edificio.

Caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería

Orenday (2016) realizó un estudio para la determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería a partir de un método no destructivo que se basa en el análisis de la propagación de ondas sísmicas. En la Figura 8 se sintetiza la metodología que se usó, la cual incluye la medición de los tiempos de viaje de las ondas elásticas generadas artificialmente (a cortante: V_s , y compresión: V_p), para determinar su velocidad de propagación, utilizando el mismo principio empleado en la prospección geofísica para recabar datos acerca de la composición del subsuelo (Sheriff y Geldart 1991).

Con las velocidades de onda se utilizaron las ecuaciones de la teoría elástica para obtener las propiedades

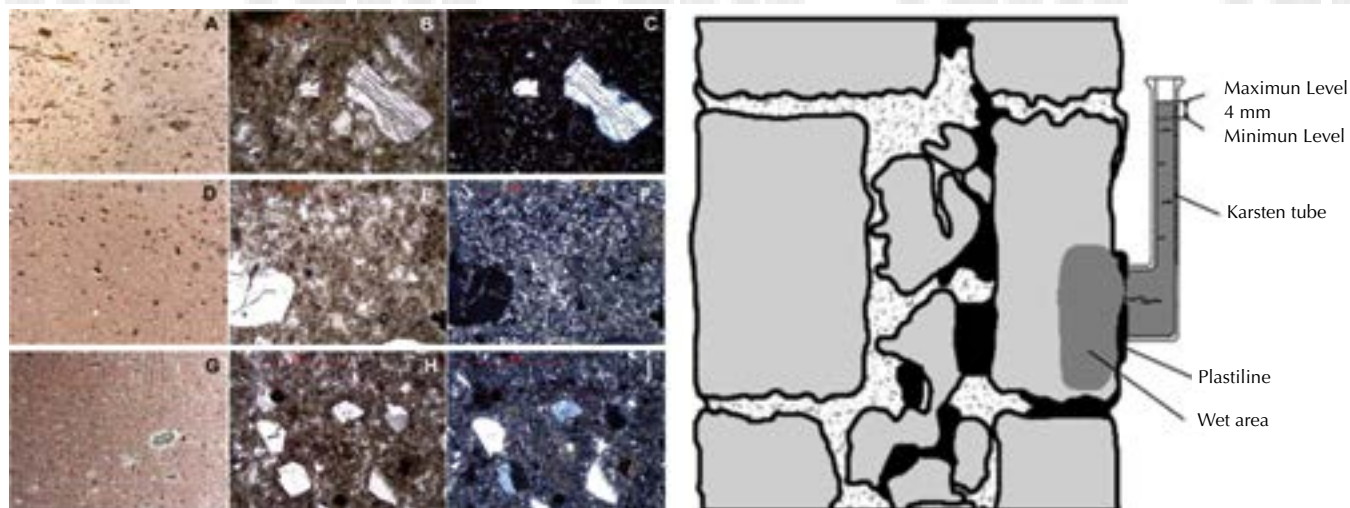


FIGURA 7. Pruebas no destructivas realizadas a piedras de la Catedral de Aguascalientes (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuente: R. Padilla *et al.* 2017).

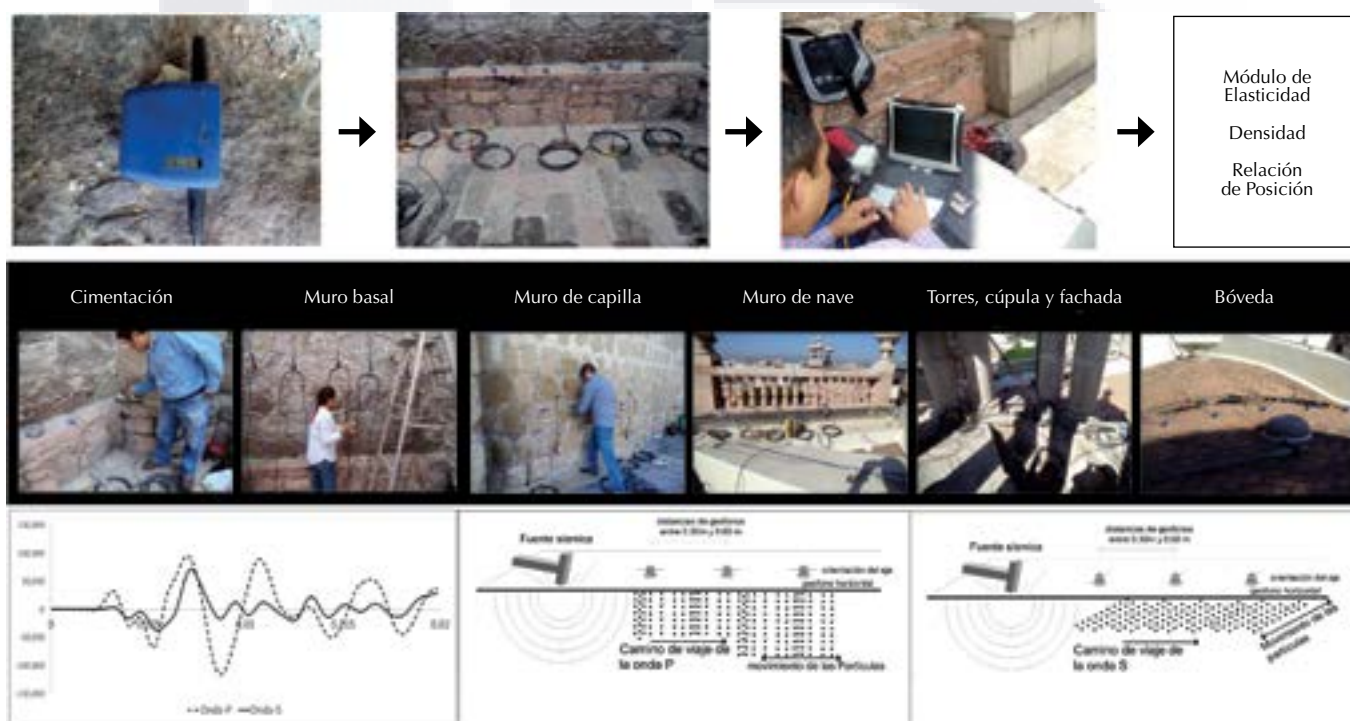


FIGURA 8. Generación y medición en campo de las ondas elásticas y su posterior análisis para la obtención de las propiedades mecánicas de los seis sistemas constructivos del templo de San Antonio de Padua (Fuente: Orenday-Tapia *et al.* 2019).

mecánicas de dicho material, tales como el módulo de Young, el peso volumétrico y la relación de Poisson (Orenday 2016; Orenday-Tapia *et al.* 2019; 2018). Estos valores son parámetros para determinar la resistencia de los materiales.

Se analizaron los seis sistemas constructivos que identificó Navarro (2013) en el templo de San Antonio de Padua (Orenday 2016; Orenday-Tapia *et al.* 2019; 2018), y se obtuvieron los valores de cada uno de ellos (Figura 9).

Dado que no se pueden tener muestras del templo para comparar los valores obtenidos con los valores de

pruebas a compresión (método tradicional), se localizaron valores teóricos y experimentales reportados por otros autores y normas italianas para determinar si los valores obtenidos tenían coherencia respecto de los valores correspondientes con el tipo de piedra de que se trataba. En la información derivada se observó que la mayoría de los valores obtenidos en este estudio, y los valores encontrados en la literatura, no varían considerablemente; sin embargo, es necesario validar el método (para conocer los parámetros que se consideraron en este estudio (*cfr.* Orenday-Tapia *et al.* 2019; 2018).

SISTEMA CONSTRUCTIVO \ DATOS	VELOCIDAD DE ONDA (PROMEDIO)		PROPIEDADES MECÁNICAS CARACTERIZADAS (PROMEDIO)		
	V _p (m/s)	V _s (m/s)	P (kg/m ³)	E _d (Mpa)	μ
Cimentación	2 002	955	2 060	5 103	0.32
Muro basal	1 478	748	1 920	2 820	0.31
Muro de capilla	638	370	1 560	530	0.23
Muro de nave principal	895	497	1 690	1 060	0.27
Muro de fachada, torres y domo	1 294	655	1 860	2 100	0.32
Bóvedas	2 313	1001	2 150	5 980	0.38

FIGURA 9. Velocidades de onda y propiedades mecánicas caracterizadas de seis sistemas constructivos del templo de San Antonio (Tabla: Edith Orenday-Tapia, 2019).

Por tal razón, la investigación sigue en curso. Se está experimentando en especímenes de mampostería de diferentes tipos de roca y tabique, los cuales serán evaluados con el método que aquí se propone y, posteriormente, se realizarán pruebas destructivas (a compresión) para determinar el grado de variación que existe entre estos dos métodos.

Esos datos podrán consultarse cuando se realicen análisis, a partir de modelaciones numéricas, para determinar el comportamiento estructural del edificio, ya que servirán como datos de entrada de las propiedades mecánicas de los materiales de los modelos numéricos.

Software aplicado al diagnóstico estructural de edificios históricos

El análisis de edificios patrimoniales religiosos implica un alto grado de complejidad: por un lado, por la geometría de los edificios, y por el otro, por el material con el que están contruidos. Afortunadamente, gracias al avance del desarrollo de *software* de análisis numérico, se pueden practicar análisis complejos para el estudio de las construcciones y conocer el comportamiento de las estructuras.

El método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés) permite calcular esfuerzos y desplazamientos, y realizar diferentes tipos de análisis (lineal, no lineal, estático, dinámico, etc.). La selección del análisis por realizar dependerá de la información con que se cuente y los resultados que se deseen obtener así como de la disponibilidad y compatibilidad del equipo y el *software* (Peña 2008).

El análisis estructural de edificios patrimoniales religiosos de Aguascalientes se ha trabajado por Navarro (2013), Ánimas *et al.* (2013), Orenday (2016) y Hernández (2018), quienes han realizado modelos del templo de San Antonio para su análisis estructural y determinar, así, su estado actual, como se observa en la Figura 10. El propósito final de un análisis numérico es conocer las zonas

críticas de la estructura donde los esfuerzos (de tensión o compresión) son muy grandes y pueden poner en riesgo la estabilidad del edificio.

Los resultados muestran que, en el templo de San Antonio, el efecto con mayor potencial de daño es el causado por la vibración del tránsito vehicular (Hernández 2018), y que los elementos más vulnerables a experimentar algún tipo de daño por dichas vibraciones son las dos torres de sus campanarios y la cúpula principal (Ánimas *et al.* 2013; Orenday 2016). Las indagaciones hechas por Navarro (2013) reportan una fisura vertical en el muro de la fachada principal del templo, observada por primera vez después de que las calles aledañas al templo se abrieron a la circulación de camiones del sistema de transporte público en la década de 1980.

Caracterización dinámica de edificios patrimoniales

La caracterización dinámica de un edificio consiste en medir las vibraciones de la estructura por efecto del ruido ambiental para determinar su frecuencia natural y modos de vibrar. Los datos obtenidos permiten validar los resultados de los análisis numéricos que se hacen del edificio, comparando los parámetros dinámicos determinados experimentalmente con los obtenidos del análisis modal del modelo numérico. Se usan, además, para identificar condiciones de daño estructural y patrones de degradación o pérdida de propiedades de resistencia de los materiales (Ánimas 2015). La finalidad principal del estudio de Ánimas (2015) fue diseñar una metodología para evaluar la salud estructural de monumentos y edificios históricos, utilizando el templo de San Antonio de Padua como caso de estudio.

Los resultados de Ánimas (2015) fueron corroborados por Hernández (2018) y evidencian que el templo de San Antonio tiene una frecuencia natural de vibrar de 3.8 Hz. Adicionalmente, Hernández (2018) comprobó que las ráfagas del viento que inciden sobre el edificio y el repicar de las campanas producen vibraciones sobre éste,

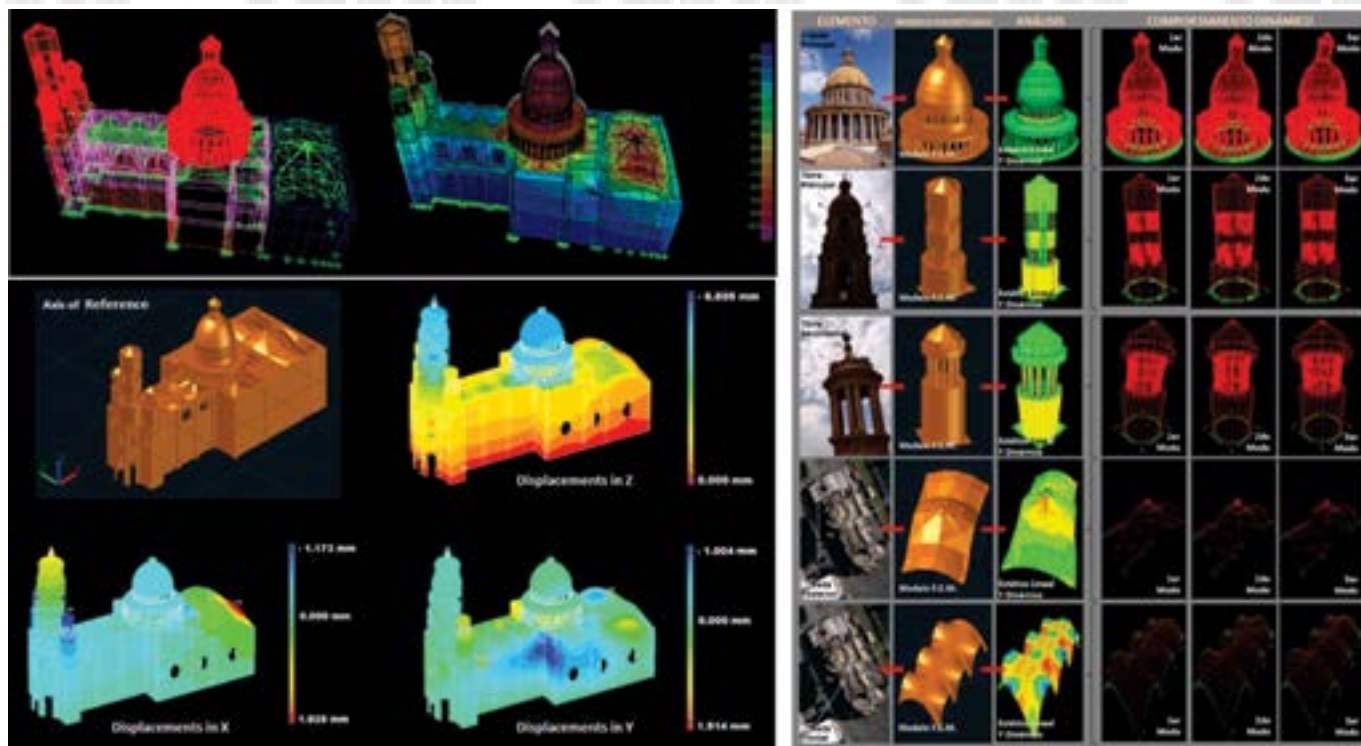


FIGURA 10. Análisis estructural a partir de modelos numéricos (Ilustración: Edith Orenday-Tapia, 2019; fuentes: H. Ánimas *et al.* 2013, Ánimas *et al.* 2014, Orenday 2016).

aunque son de menor intensidad que las causadas por el tránsito vehicular.

Consideraciones finales y perspectivas

Aunque en Aguascalientes el número de personas que profesan el catolicismo, identificadas como los “usuarios” principales de los edificios religiosos, muestra una tendencia a disminuir, la conservación de dichas construcciones es una prioridad para las autoridades locales debido a que conforman parte del patrimonio histórico, cultural y arquitectónico de la ciudad.

En Aguascalientes, el estudio de estos edificios hasta hace poco se limitaba a aspectos históricos, arquitectónicos y estéticos; no obstante, en ocasiones especiales, cuando mostraban deterioros visibles, también se hacían estudios de levantamiento de daños para orientar los trabajos de restauración. Sin embargo, los estudios de comportamiento estructural de dichos edificios se realizaron a partir de 2015, cuando el grupo de IEEP de la UAA comenzó a analizarlos desde este punto de vista.

Los estudios de la Catedral de Aguascalientes y el templo de San Antonio de Padua han proporcionado información sobre su estado actual y sus materiales así como acerca de los sistemas constructivos empleados y la estabilidad de la estructura en general. Adicionalmente, con la caracterización dinámica de los edificios mediante

registros de vibración ambiental, se han calibrado y validado los modelos numéricos elaborados para simular su comportamiento estructural, logrando un incremento en la confiabilidad de los resultados de la simulación numérica. Por otra parte, se han iniciado estudios del proceso de degradación de los materiales debido al intemperismo, para entender de qué manera cambia la rigidez global del edificio y su comportamiento estructural.

Todos los estudios sobre estos dos edificios religiosos muestran que, a pesar de que han sido afectados por diversos factores (intemperismo, tránsito vehicular, degradación de los materiales, etc.), no están en peligro de colapso; sin embargo, debido a su importancia y a que continúan recibiendo a los feligreses, se hace necesario conservarlos en monitoreo y prever trabajos de mantenimiento para asegurar su preservación.

Aunque previamente se han realizado intervenciones en estos y otros edificios patrimoniales de la ciudad, las investigaciones realizadas en los dos templos aquí referidos aportan nuevos elementos para formular propuestas de intervención integral, previendo aspectos tanto estético-arquitectónicos como desde el punto de vista de la estabilidad estructural.

Actualmente existe interés del Centro INAH Aguascalientes por los resultados de los estudios del comportamiento estructural de los edificios obtenidos por el grupo de IEEP. Se espera que en el futuro cercano esos estudios se integren a los diagnósticos que se realizarán en las propuestas de consolidación y restauración de las

construcciones históricas, para que, con estos estudios inter y transdisciplinarios, se pueda preservar tanto la belleza arquitectónica de los edificios patrimoniales como el valor religioso que sostiene la identidad cultural de la población de la localidad.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA, México), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt, México), a la parroquia del templo de San Antonio de Padua y a la Catedral de Aguascalientes, por su apoyo durante los trabajos de investigación.

Referencias

Aguilera, P.

2013 *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate*. México, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ánimas, H.

2015 "Evaluación del empleo del modo de vibrar como indicador de la condición estructural de edificios históricos", tesis de doctorado en ciencias de los ámbitos antrópicos. México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Ánimas, H., J. Pacheco y J. Ortiz

2014 "Evaluation of the structural health of heritage buildings by the use of vibration-based damage detection methods", en *Cultural HELP 2014. Cultural Heritage and Loss Prevention, at Porto, Portugal*, pp. 95-106, documento electrónico disponible en [https://www.researchgate.net/publication/269701954_Evaluation_of_the_structural_health_of_heritage_buildings_by_the_use_of_vibration-based_damage_detection_methods], consultado en mayo de 2018.

Ánimas, H., M. Navarro, J. Pacheco, J. García, M. Arroyo, T. Cordero, y C. Esparza.

2013 "Morfología y comportamiento estructural del templo de San Antonio", en *3er Foro Internacional en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos y Jornadas Internacionales de Investigación*, Aguascalientes, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes/Universidad de Alcalá de Henares.

Bryan, P., y H. Chandler

2008 "Cost-effective rock-art recording within a non-specialist Environment", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36: 259-264.

Castro, M.

2016 "Evaluación y calibración de las técnicas de fotogrametría digital aplicadas a la caracterización geométrica de obras patrimoniales", tesis de maestría en ingeniería civil, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Cedeño, A.

2008 "Valoración de las condiciones de la estructura antigua", *Diseño y Sociedad* 25-26: 72-81.

Corpus, R.

1969 *Aguascalientes. La Catedral y el cabildo*. Aguascalientes, Imprimatur.

De Solà-Morales, I.

2015 [1982] "Teorías de la intervención arquitectónica", *Cuatro Cuadernos*, documento electrónico disponible en [https://cuatrocuadernos.wordpress.com/teorias-de-la-intervencion-arquitectonica/], consultado en diciembre de 2018.

Gobierno del Estado de Aguascalientes

2010 *Templo de San Antonio* [Turismo], documento electrónico disponible en [http://www.vivaaguascalientes.com/UI/frm_Datos.aspx?IA=373], consultado en febrero de 2015.

Gutiérrez, J. A.

2003 *El siervo de Dios monseñor José de Jesús López y González*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes/Obispado de Aguascalientes/Congregación Maestras Católicas.

2006 *Historia de la Iglesia católica en Aguascalientes* (3 vols.), México, Universidad Autónoma de Aguascalientes/Obispado de Aguascalientes.

2007a *Cien años de vida de la Diócesis de Aguascalientes*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

2007b *La labor social de la Iglesia católica en Aguascalientes*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Harvey Jr. D., M. Schuller

2010 "Nondestructive evaluation: structural performance of masonry", *Practice Points* 9: 1-8, documento electrónico disponible en [http://www.apti.org/clientuploads/publications/PracticePoints/PracticePoints9.pdf], consultado en mayo de 2018.

Hernández, L.

2018 "Medición y caracterización de vibraciones en tiempo real de estructuras para el estudio de su comportamiento", tesis de maestría en ingeniería civil, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Imdosoc

2015 *Creer en México. Encuesta Nacional de Cultura y Práctica Religiosa*, Instituto Mexicano de Doctrina Social Cristiana, documento electrónico disponible en [http://www.imdosoc.org/web/creer-en-mexico-encuesta-nacional-de-cultura-y-practica-religiosa], consultado en mayo de 2018.

INAH

2018 *¿Quiénes somos?*, documento electrónico disponible en [https://www.inah.gob.mx/quienes-somos], consultado en diciembre de 2018.

Inegi

2010 *Censo General de Población y Vivienda 2010*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Martínez, A.

2016 "Identidades y patrimonios. Repensando la dinámica social", en *Identidades y patrimonios. Encrucijadas entre lo material y lo intangible*, México, Fontamara/Universidad de Guanajuato, pp. 11-27.

Muñoz, M.

1996 *Fiestas populares en la región de Aguascalientes*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Navarro, M.

2013 "Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual", tesis de maestría en ingeniería civil, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Orenday, E.

2016 "Estudio de caracterización de las propiedades mecánicas del Templo de San Antonio para su análisis dinámico", tesis de maestría en ingeniería civil. México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Orenday-Tapia, E. E., J. Pacheco-Martínez, R. Padilla-Ceniceros, H. Ánimas-Rivera, J.A. Ortiz-Lozano y D. Gaxiola-Apodaca

2019 "Characterization of the mechanical properties of ancient masonry from a non-destructive method in situ", en R. Aguilar et al. (eds.). *Structural Analysis of Historical Constructions*, Rilem Bookseries, pp. 370-378, DOI: 10.1007/978-3-319-99441-3_39.

Orenday-Tapia, E. E., J. Pacheco-Martínez, R. Padilla-Ceniceros y R. A. López-Doncel

2018 "In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry", *Environmental Earth Sciences* 77 (7): 286, DOI:10.1007/s12665-018-7473-8

Padilla, M. R.

2009 "Perfiles socioculturales de ciudadanía. Identidades urbanas y geografías mediáticas. Estudio de cinco escenarios en la ciudad de Aguascalientes", tesis de doctorado en estudios científicos-sociales en la comunicación, México, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente/Universidad Jesuita de Guadalajara.

2013 "Dios en los medios. El caso de la Iglesia de Jesucristo de los Santos de los Últimos Días en Aguascalientes", en María Eugenia Patiño (coord.), *Creencias y prácticas religiosas en Aguascalientes: ensayos interpretativos*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 103-125.

Padilla, R.

2017 "Desarrollo y adaptación de técnicas de caracterización física de sistemas constructivos en edificios patrimoniales con métodos no destructivos para la conservación del patrimonio histórico", tesis doctoral en ciencias de los ámbitos antrópicos, Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Padilla, R., J. Pacheco, R. López y E. Orenday.

2017 "Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, Mexico", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34 (2): 138-149.

Padilla, R., T. Sonnemann y J. Pacheco.

2015 "Reconocimiento de daños y patologías de zonas de difícil acceso de la catedral basílica de Aguascalientes mediante el UAVPhantom II Vision Quadcopter", en *Convergencias del diseño y de la construcción IV. Arquitectura, ingeniería civil y urbanismo. Sociedad, patrimonio urbano y sustentabilidad*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 370-386.

Padilla, Y.

2013 "Creencias y tolerancia religiosa en Aguascalientes: una aproximación histórica y social", en M. E. Patiño (coord.),

Creencias y prácticas religiosas en Aguascalientes: ensayos interpretativos, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 77-101.

Patiño, M. E.

2013 "Las creencias y las prácticas religiosas a través de las encuestas en México; un acercamiento desde las cifras", en M. E. Patiño (coord.). *Creencias y prácticas religiosas en Aguascalientes: ensayos interpretativos*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 19-48.

Patiño, M. E., y E. Tapia

2009 "Construyendo espacios: la contribución de las religiones católicas", en S. Bénard y O. Sánchez (coords.), *Vivir juntos en una ciudad en transición. Aguascalientes frente a la diversidad social*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 217-241.

Patiño, M. E., y G. Zalpa

2014 "Cultura religiosa en Aguascalientes", en R. de la Torre, C. Gutiérrez, M. E. Patiño, Y. Silva, H. J. Suárez y G. Zalpa (coords.), *Creer y practicar en México: comparación de tres encuestas sobre religiosidad*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes/Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social/Colegio de Jalisco, pp. 63-100.

Peña, F.

2008 "Estrategias para el modelado y el análisis de edificios históricos de mampostería", en *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Veracruz, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, pp. 1-14.

Reyes, A.

2013 *Refugio Reyes, una vida. El aprendizaje*, Aguascalientes, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.

SAHC

2019 *Structural Analysis of Historical Constructions*, R. Aguilar, D. Torrealva, S. Moreira, M. Pando, L. F. Ramos, (eds.), Nueva York, Springer International Publishing (Rilem Bookseries, 18), documento electrónico disponible en [https://www.springer.com/us/book/9783319994406], consultado en diciembre de 2018.

Saldívar, J. A.

2015 "Historia de la orden religiosa de San Agustín en Aguascalientes. Alcances históricos, institucionales y educativos", tesis doctoral en ciencias sociales y humanidades, Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Schuller, M.

2006 "Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures", en *In-situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures*, Praga, NSF/Rilem Workshop, documento electrónico disponible en [https://www.rilem.net/images/publicis/pro062-007.pdf], consultado en mayo de 2018.

Sheriff, R., y L. Geldart

1991 *Exploración sismológica, vol. I. Historia, teoría y obtención de datos*, Mexico, Limusa.

Tapia, E.

2011 "Virgen de media noche y otras más... (Las mujeres en el bolero)", en Antonio Higuera (coord.), *Religión y culturas contemporáneas*, México, Universidad Autónoma de Aguas-

calientes, Cuerpo Académico de Estudios de la Cultura Contemporánea-Red de Investigadores del Fenómeno Religioso en México, pp. 355-374.

Terán, J.

2004 "Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica", *Conserva* 8: 101-122, documento electrónico disponible en [<http://www.cncr.cl/611/w3-article-4673.html>], consultado en mayo de 2018.

Vekey, R.

1988 "Non-destructive test methods for masonry structures", *IBMAC 1988: 8th International Brick and Block Masonry Conference*, 3: 1673-1681, documento electrónico disponible en [<http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1988/1673.pdf>], consultado en mayo de 2018.

Villegas, V. M.

1974 *Arquitectura de Refugio Reyes*, México, Imprenta Madero. Zalpa, G.

2003 *Las iglesias en Aguascalientes. Panorama de la diversidad religiosa en el estado*, México, Centro de Investigaciones y Estudios Multidisciplinarios de Aguascalientes/Universidad Autónoma de Aguascalientes/Colegio de Michoacán.

2013 "Del dicho al hecho... ser creyentes en Aguascalientes", en M. E. Patiño (coord.), *Creencias y prácticas religiosas en Aguascalientes: ensayos interpretativos*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 49-75.

2014 *Enciclopedia de las religiones en México*, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Síntesis curricular de/los autor/es

Edith Estefanía Orenday Tapia

Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México
eeorenday@gmail.com

Licenciada en arquitectura (Universidad Autónoma de Aguascalientes [UAA], México), maestra en ingeniería civil con salida de especialización en estructuras (UAA) y estudiante del doctorado en ciencias de los ámbitos antrópicos (UAA). Miembro de Investigación en Ingeniería Estructural de Edificios Patrimoniales (IEEP-UAA), donde también es docente. Actualmente, investiga métodos no destructivos para la obtención de propiedades mecánicas de mampostería en edificios patrimoniales. Sus publicaciones más recientes son "In situ and Nondestructive Characterization of Mechanical Properties of Heritage Stone Masonry", en *Environmental Earth Sciences* (2018), y "Characterization of the Mechanical Properties of Ancient Masonry from a Non-Destructive Method in situ", en *Rilem Bookseries*, vol. 18 del SAHC (2019).

Evangelina Tapia Tovar

Departamento de Sociología y Antropología, Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México
etapia@correo.uaa.mx

Licenciada en sociología (Universidad Autónoma de Aguascalientes [UAA], México), maestra en investigación en ciencias del hombre (UAA), y doctora en ciencias sociales, en la línea de estudios culturales (UAA). Profesora-investigadora de tiempo completo del Departamento de Sociología y Antropología

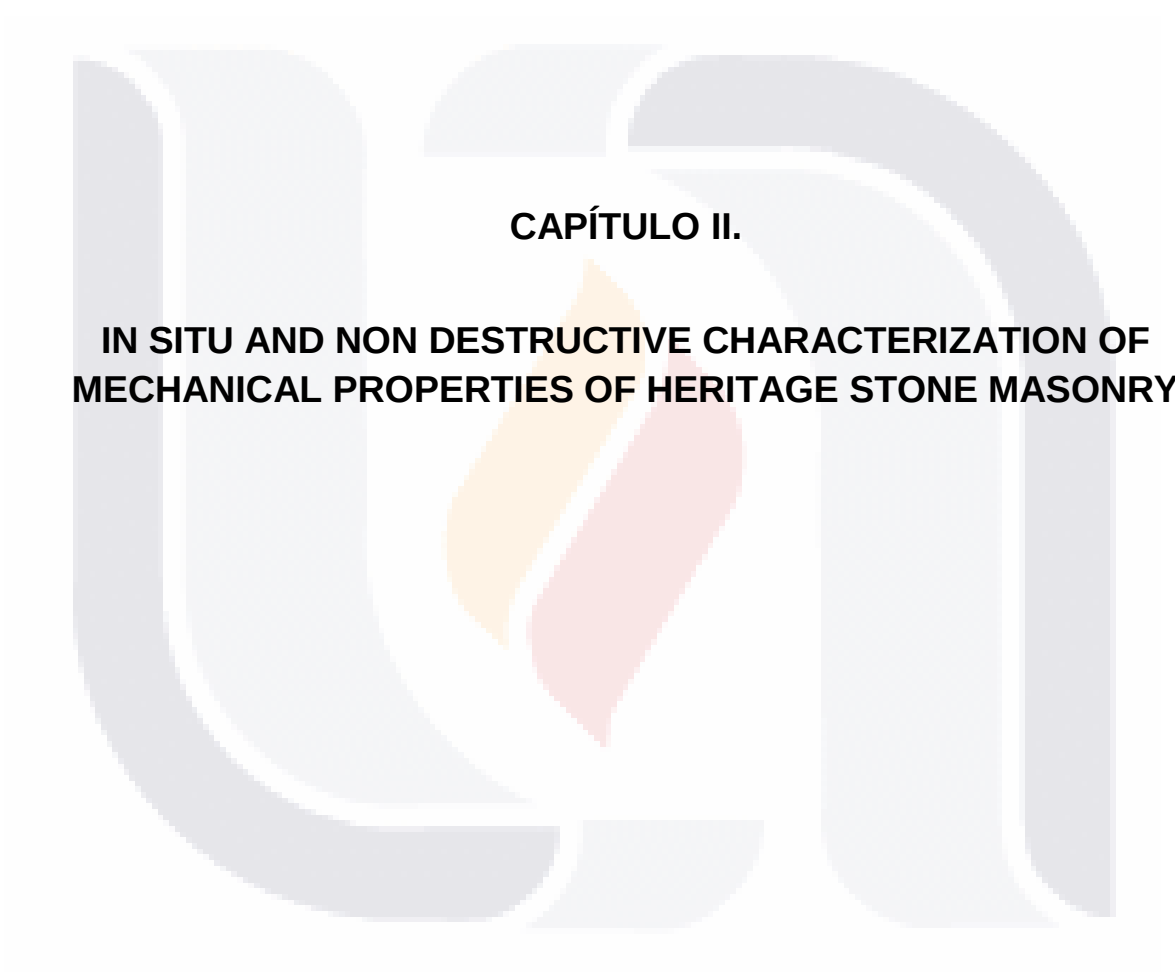
desde 1986, donde imparte cátedra y dirige tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), nivel 1, del Cuerpo Académico Consolidado Estudios Socioculturales (Prodep) y del Programa Nacional de Investigación en Rendición de Cuentas y Combate a la Corrupción (CIDE). Ha realizado investigaciones sobre religión, música y corrupción, y publicado artículos, capítulos y libros; el más reciente es "La vuelta al mundo de la corrupción en veinte refranes".

Jesús Pacheco Martínez

Departamento de Construcción y Estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), México

jesus.pacheco@edu.uaa.mx

Ingeniero civil (Universidad Autónoma de Querétaro [UAQ], México), maestro en ciencias con especialidad en ingeniería estructural (UAQ) y doctor en ciencias de la tierra con especialización en exploración geofísica (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), nivel 1. Sus líneas de investigación son ingeniería estructural de edificios patrimoniales y ciencias de la tierra aplicada a ingeniería civil; es miembro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, American Geophysical Union, entre otras, y profesor-investigador del Departamento de Construcción y Estructuras de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) desde 2006, donde imparte cátedra y dirige trabajos de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Ha publicado artículos indizados en JCR, libros y capítulos.



CAPÍTULO II.

IN SITU AND NON DESTRUCTIVE CHARACTERIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HERITAGE STONE MASONRY

Binghui Zheng · Shengrui Wang
Yanwen Qin · Stefan Norra
Xiaofu Liu *Editors*

Environmental Earth Sciences

Environmental Research of
the Three Gorges Reservoir



In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry

Orenday-Tapia Edith Estefanía¹ · Pacheco-Martínez Jesús¹ · Padilla-Ceniceros Raudel^{1,2} · López-Doncel Rubén Alfonso³

Received: 31 October 2017 / Accepted: 31 March 2018 / Published online: 7 April 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

The necessity of conserving and preserving the heritage is nowadays a developing study line for several researchers. From a civil engineering perspective, one of the most important issues for the conservation of historical buildings is to ensure the structural stability. For this purpose, it is necessary to determine the mechanical properties of the ancient construction materials. However, these structures cannot be evaluated by destructive tests due to politics and restrictions for preserving the heritage built. As a consequence, new methods that do not put in risk the integrity of the materials and the structure are becoming useful tools for researchers who work on structural engineering of heritage buildings. This paper presents a nondestructive method (NDM) that has been used to characterize the mechanical properties of different constructive systems of the San Antonio de Padua Temple, which is a religious icon in Aguascalientes, Mexico. This method includes the measuring of seismic waves' travel time in order to obtain shear and compressional velocity waves. Results show that with this method mechanical properties of masonry can be obtained such as Young's modulus, Poisson ratio and bulk density, which are needed for the structural analysis using numerical simulation models.

Keywords Nondestructive method · Masonry mechanical characterization · Cultural heritage · Temple of San Antonio de Padua

This article is part of a Topical Collection in Environmental Earth Sciences on “Stone in the Architectural Heritage: from quarry to monuments – environment, exploitation, properties and durability”, guest edited by Siegfried Siegesmund, Luís Sousa, and Rubén Alfonso López-Doncel.

✉ Pacheco-Martínez Jesús
jesus.pacheco@edu.uaa.mx

Orenday-Tapia Edith Estefanía
edith_89ot@hotmail.com

Padilla-Ceniceros Raudel
raudel.padilla@cegea.biz

López-Doncel Rubén Alfonso
rlopez@uaslp.mx

¹ Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, 20131 Aguascalientes, Ags, Mexico

² CeGeA SC – Consultores en Geociencias Aplicadas SC, Xochicalco 412, Lomas de Jesús María, 20925 Jesús María, Ags, Mexico

³ Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Av. Dr. Manuel Nava #5, Zona Universitaria, 78240 San Luis Potosí, S.L.P., Mexico

Introduction

Since pre-Columbian epoch, natural stones were the most used material for the constructions in Mexico due to their great availability and high resistance to weathering. After Spanish conquerors arrived to the current territory of Mexico, many buildings were erected using stone masonry as main material for structural and ornamental elements. Many of these buildings have been destroyed, but those still endured until nowadays are considered heritage buildings. Thus, their conservation is a collective concern involving several knowledge disciplines.

Conservation work of heritage buildings includes tasks on esthetical aspects, architectural issues and stability assessment. The main objective of a structural engineering study is to determine the level of safety of the studied building to support its own weight, and to assess its behavior against other extraordinary and more extreme effects as seismicity, vibrations or elimination (temporal or permanent) of structural elements. These studies include the mechanical characterization of the building materials; however, due to the

inherent constraints on its historical and heritage value, the mechanical properties determination for historical building materials by destructive techniques is not allowed.

According to Harvey and Schuller (2010), when historic masonry buildings are assessed to determine its load capacity global support, it is critical to have information about the strength of the masonry. Nevertheless, the determination of physical and mechanical properties as shear and Young's modulus, Poisson ratio, and bulk density has a huge importance for the structural analysis of buildings because those parameters are input data. Results from structural analysis will depict accurately the building behavior, as long as mechanical properties used as input are representative of the stone masonry of the studied building (Oliveira 2000; Arêde et al. 2017).

Determining the mechanical properties in modern buildings is relatively simple. Material characterization can be conducted in a laboratory through standardized methods applied to samples of the material or in situ by load tests. Moreover, most of modern buildings were built with bricks, concrete and steel, which are manufactured under controlled processes to ensure a predefined quality; hence, some few determinations should be enough to obtain a representative value of material properties. However, the characterization of the materials of historical masonry buildings becomes a complex task due to:

- (a) Invasive and destructive in situ testing is forbidden, and also obtaining material samples for laboratory testing is restricted for special cases in a very limited number of samples;
- (b) The masonry as main material is a heterogeneous, orthotropic (Jafari et al. 2017) and anisotropic composite; hence, the mechanical properties of the masonry are the contribution of the mortar and stone properties (Arêde et al. 2017; Almeida et al. 2012);
- (c) Materials constituting masonry (stone and mortar) have been affected along the time by weathering and anthropogenic effects, modifying their properties. Although if any record of the masonry strength in its initial condition could exist, after decades or hundreds of years, it is significantly different (Harvey Jr. and Schuller 2010). Furthermore, mechanical characteristics of reproduced masonry samples with new materials could not be representative of characteristics of old masonry, even when stone materials came from the same quarry that original ones, and mortar is elaborated with the original recipe and similar materials (Almeida et al. 2012).

As a consequence, there is a necessity to apply in situ and nondestructive tests (NDTs) for characterizing the construction materials of these types of buildings, in order to provide information of its current mechanical properties, especially

of the stone masonry which is the most reoccurring material in historical buildings.

NDT can be applied to materials or structures to obtain information as its shape (internal or external configuration), physical condition or mechanical properties without damaging any part of the building (Vekey 1988). Most of NDT as rebound hardness, impact-echo, stress wave transmission, topographic imaging, infrared thermography, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT), applied to research masonry, are addressed to obtain qualitative information about physical characteristics of the masonry as voids, weaknesses, deterioration, or to reveal some anomalies of masonry structures (McCann and Forde 2001; Schuller 2003; Capozzoli and Rizzo 2017).

The flat-jack test allows the estimation in situ of stress and deformability properties of masonry (Schuller 2003; Arêde et al. 2017), but it is a partial invasive method which causes some damage to the stone masonry. Elastic properties of the masonry as Young's modulus, shear modulus and Poisson ratio, that are input data for numerical simulation of the building behavior, can be obtained from vertical and diagonal compression test on masonry specimens (Magenes et al. 2010; Almeida et al. 2012); however, these tests are completely destructive.

The ultrasonic pulse velocity (UPV) method is the only NDT that gives information about elastic modulus (Vekey 1988; Jain et al. 2013; Vasanelli et al. 2015, 2016, 2017). Although this method is standardized for concrete, it is commonly used separately on cores of both stones and mortar. Nevertheless, the method has not been implemented satisfactory on structural elements of stone masonry in field conditions.

It is from these restrictions mentioned above, and from the necessity to find a NDT that allows to determine the elastic properties of the masonry in situ, the use of the mechanical wave transmission (seismic waves) for the mechanical characterization of the masonry is proposed, where the masonry is assumed as a composite material. This technique involves the measurement of the time needed for an induced mechanical wave to pass through the material. Using the subsequent calculation of the wave velocity, some properties of the material as dynamic stiffness (dynamic Young's modulus), Poisson ratio and bulk density can be obtained. Till now, this method has been used for getting qualitative information as the localization of voids or gaps in the construction materials (Schuller 2003, 2006).

This paper presents a methodology for determining in situ the mechanical properties of masonry of heritage buildings by means of seismic techniques. Seismological exploration is a geophysical method that studies the propagation of elastic waves generated artificially to obtain data about the subsoil composition, in other words to infer the configuration of the different substrates of the subsoil as well as its

mechanical properties (Sheriff and Geldart 1995). On that basis, the use of a seismic method is proposed to determine the mechanical properties of the masonry of the heritage buildings.

The presented work includes the mechanical characterization in situ of five masonry constructive systems (CS) of the Temple of San Antonio which is located in Aguascalientes, Mexico. A comparison of the obtained results against properties of masonry reported in the scientific literature is also included. Results show that this methodology allows to get a reliable information on mechanical properties of masonry without causing damage on the cultural heritage.

Theory and methods

Elasticity theory allows to determine the dynamic elastic properties of the materials from the propagation velocity of compressional waves (V_p) and shear waves (V_s) through rocks (Sheriff and Geldart 1995; McCann and Entwisle 1992; Schuck and Lange 2007).

The propagation velocity of elastic waves through natural rock formations depends on factors such as porosity, density, lithology, cementation, depth, age, lithostatic pressure, interstitial fluids presence (Han et al. 1986; Sheriff and Geldart 1995; Cook 1992; Eitzenberger 2012; Lee and Yoon 2014). Those factors are present in the stone masonry walls of historic constructions; thus, the travel time measurements of seismic waves through masonry can be used to obtain information on its mechanical properties of structural engineering interest.

By means of elasticity equations, once computed V_p and V_s in the masonry to be characterized, elastic Lamé constants (λ and μ) can be calculated (Eqs. 1 and 2). Here, μ is an indicator of the resistance to shear strain, and it is often called shear modulus.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (2)$$

According to Gardner et al. (1974), masonry bulk density (ρ) can be determined by Eq. 3.

$$\rho = 0.31 V_p^{1/4} \quad (3)$$

From the elasticity theory, V_p and V_s can be correlated to elastic dynamic modulus E_d and Poisson ratio ν by Eqs. 4 and 5.

$$E_d = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (5)$$

The implemented methodology to calculate V_p and V_s in the studied stone masonry was based on the basic principle of subsoil seismic exploration using equipment regularly employed for geophysical surveys. Horizontal uniaxial velocity sensors were placed at specific distances along a linear arrangement on the masonry element in order to register the travel path of the elastic wave, which was generated hitting over the masonry element with a two pounds hammer at both ends of the linear arrangement (Fig. 1). As the generated wave pulse includes both compressional and shear waves (P-wave and S-wave), a measurement was taken placing the sensor with its axis aligned to the wave path to register P-wave, and other measurement was taken placing the sensor axis normal to the wave path in order to register the horizontal component of S-wave.

The used instruments for this measurement were 14-Hz horizontal geophones connected to a seismometer GEODE from Geometrics as recorder unit (GEOMETRICS 2016). The survey array included groups of four-to-six geophones aligned and connected to a laptop controlling the data acquisition as Fig. 2 shows.

Arrival times of P-wave and S-wave can be identified in the produced seismograph of each shot (Fig. 3). This is the time that the elastic wave takes to travel from the source pulse (shot) to each velocity sensor placed to different distances from the shot point. Arrival times of P-wave and S-wave are identified as the first break after the straight line in the seismic record. In addition, S-wave arrival time can be recognized because it has a delay respecting P-wave.

Case study

The Temple of San Antonio de Padua is located in the center of the city of Aguascalientes, Mexico. It has an eclectic style, which means that it possesses several architectural styles such as Neo-Renaissance, Neo-Baroque, Neo-Gothic, Neo-Classical, Arabic and Russian. It was built between 1895 and 1908 and designed by Refugio Reyes (Reyes-Rodriguez 2013).

Navarro-Hernandez (2013) classified five CS of the San Antonio de Padua Temple, which comprises all the masonry wall systems of the building. Subsequently, Orenday-Tapia (2016) classified the towers of the temple in the CS 05 and proposed the CS 06 that includes the roof covering system based on vaults (Fig. 4).

Table 1 shows the characteristics of each CS. The stone type, the color and the type of masonry joints are included.

Figure 5 shows field measurements taken to obtain the P-wave and S-wave travel time through the CS of the studied building. A lineal array of geophones was placed in distances between 0.30 and 0.60 m from each other.

Fig. 1 Scheme of the linear arrangement of velocity sensor used to record P-wave and S-wave

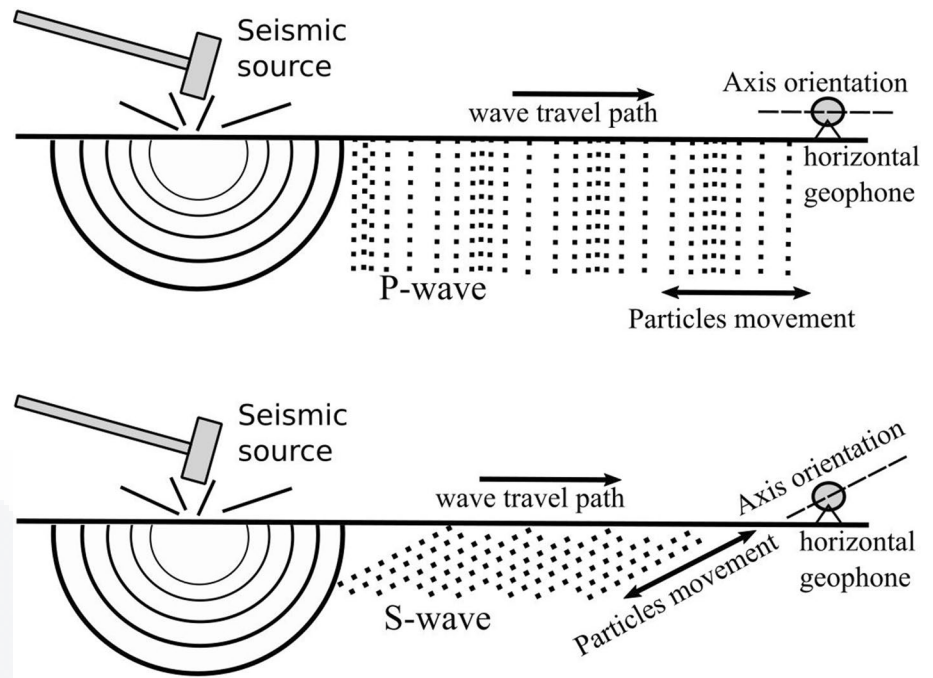


Fig. 2 Geophones in the field measurements: **a** 14-Hz horizontal geophone; **b** implemented geophones array over masonry elements



Travel velocity of seismic waves can be calculated by determining the arrival time of the P-wave and S-wave and the distance from the wave source to the geophone where waves were registered. Subsequently, using the formulas of elasticity (Eqs. 1 to 5), the mechanical properties of masonry as a unit (composite) can be obtained.

Results

The characterization of the five CS shown in Fig. 4 and Table 1 was performed according to the theory and methods section. To conduct each determination, the P-wave and S-wave arrivals were identified in the resulting seismogram (Fig. 3). After V_p and V_s were calculated and with the elasticity equations (Eqs. 1 and 2), the Lamé constants (λ and μ) were computed. Finally, the bulk density (Eq. 3), the Young's modulus (Eq. 4) and Poisson ratio (Eq. 5) were obtained.

Results of the velocity wave determinations are summarized in Table 2. The type of characterized constructive systems is listed in the first column, while in the second one the number of determinations made in each constructive system is presented. The calculated velocities waves are presented in the subsequent columns. Maximum (Max), minimum (Min) and average (Ave) values are shown.

The resulted mechanical characteristics are summarized in Table 3. The first column contains the type of characterized constructive system; the subsequent columns show the determined mechanical properties of each constructive system. Maximum, minimum and average values are shown.

Discussion of results

The application of the equations derived from the elasticity theory implies that masonry follows Hooke's law. This assumption is true only if permanent deformations

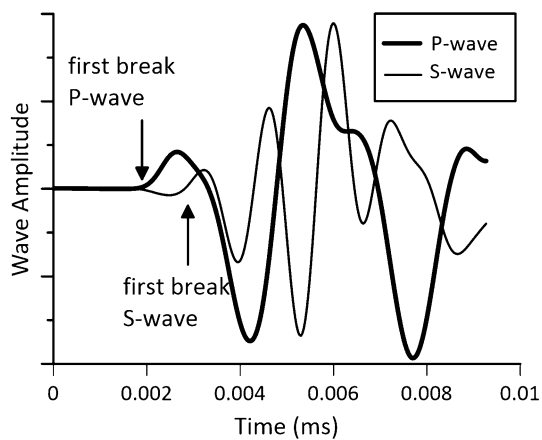


Fig. 3 Example of produced seismograph in which arrival time of P-wave and S-wave can be identified

are not produced during in situ characterization. The proposed method involves elastic waves' generation traveling through the studied masonry, whose amplitude and energy are low enough in order that permanent deformations are

not produced. Hence, the implemented methodology works on the elastic and linear range of the masonry mechanical behavior.

Although masonry is a heterogeneous composite material, the determined mechanical parameters include the contribution of all materials (mortar and stones) through which mechanical waves were propagated. Therefore, they are representative of the properties of masonry as a composite material.

Furthermore, homogeneity assumption is highly consistent with reality when volume of masonry is large enough, and consequently, the relative size of the stones and mortar volume is small regarding the dimensions of the total volume of masonry. This fact is almost true in masonry walls of heritage buildings, due to the fact that the constructive techniques based on load-bearing walls used for heritage buildings before the reinforced concrete invention resulted in large-thickness walls with a large volume of masonry.

In order to characterize the masonry of a complete building, determinations have to be implemented for each masonry type. Determinations for this study case were

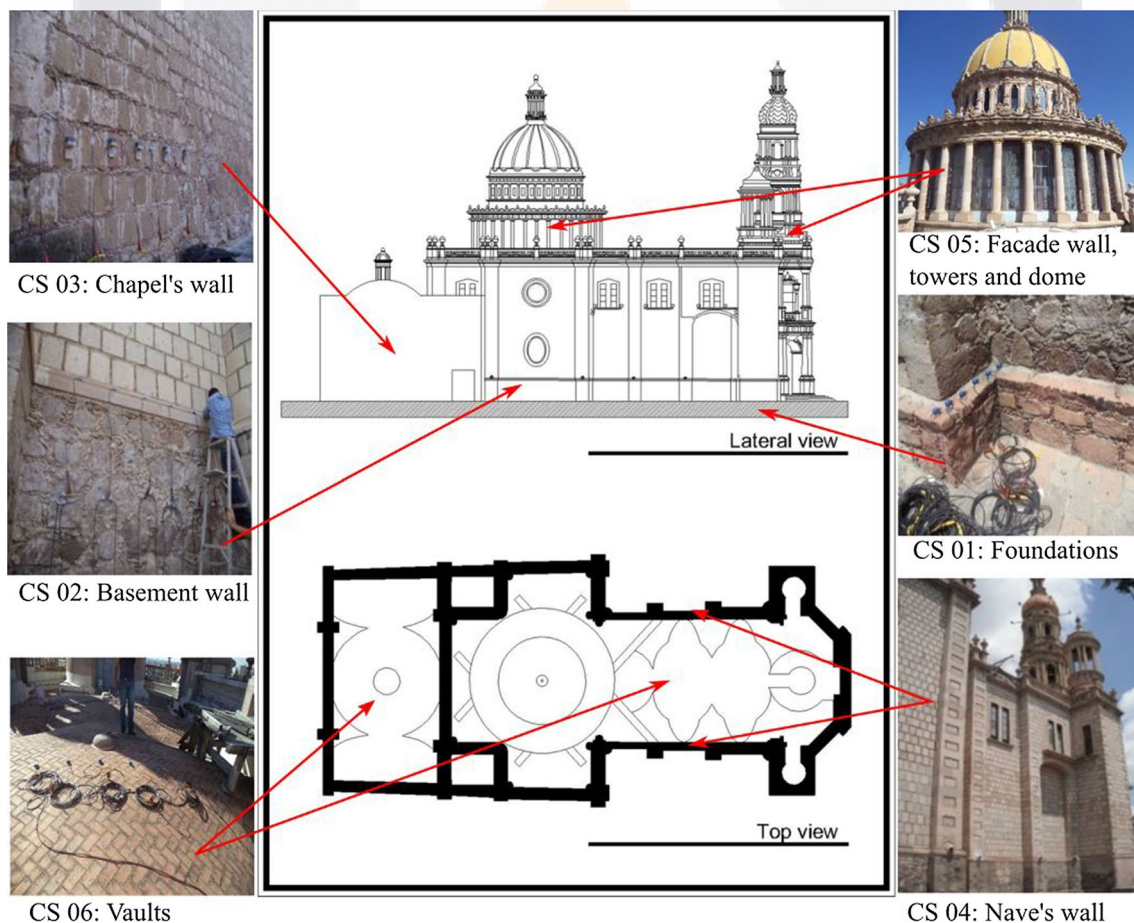


Fig. 4 View of the constructive systems characterized for this study. CS06 is not reported in this study because it is not masonry elaborated with natural stones

Table 1 Characteristics of each CS of the Temple of San Antonio de Padua

C.S.	Figure	Description
01 Foundations		Masonry based on prismatic blocks of well-welded rhyolitic tuff of grain size fine to medium of salmon-orange color, with small sharp stone fragments of the same material in the spaces between the main stones
02 Basement wall		Masonry based on slightly rounded rhyolite fragments, with small stone fragments of the same material in the spaces between the main stones
03 Chapel's wall		Masonry composed by blocks of clayey sandstone containing a bit of organic material. The stones are pieces coarsely squared, with stone chips of gray tuff (remnants of the Façade material) placed between the main stones
04 Nave's wall		Masonry composed by cubic ashlars of light-beige coarse-grained tuff poorly welded. Ashlars size averages is 35×35 cm. It has stone chips of gray tuff (remnants of the Façade material) placed between the ashlars
05 Façade's wall, towers and dome		Ornamental masonry. Unknown core covered by plates of two tuff types: the first one is a fine-grained green-yellow well-welded tuff with pseudo-stratifications of the two colors. The second is a fine-grained pink-beige well-welded tuff. The space between plates is less than 2 mm

Table 1 (continued)

C.S.	Figure	Description
06 Vaults*		Roofing system based on clay-brick vaults. Spaces between clay and bricks are mortar filled

*Not reported in this study because it is not masonry elaborated with natural stones

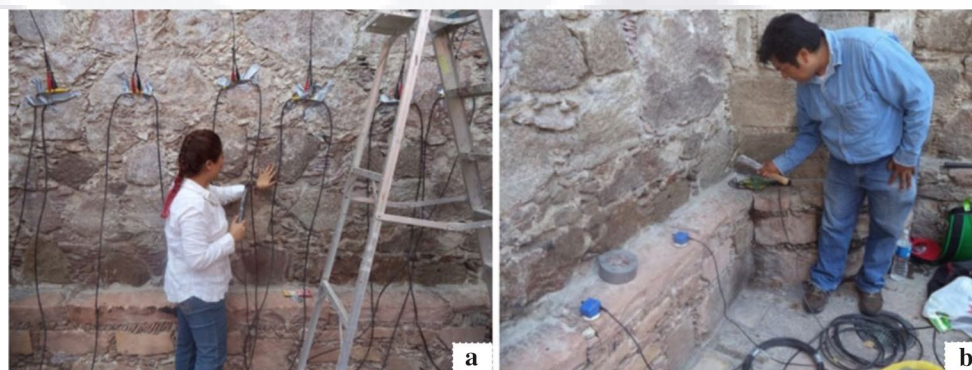


Fig. 5 Measurements taken to determine the stone masonry mechanical properties of the Temple of San Antonio de Padua by V_p and V_s assessment: **a** on masonry basement wall; **b** on masonry foundations

implemented on each constructive system that were discretized and classified according to their physical characteristics at naked eye and their structural function in the building.

Figures 6, 7 and 8 show the comparison between mechanical properties values reported in the literature (MDIT 2009; Marcari et al. 2009, 2010; Calderoni et al. 2009; CESI 2005) and the obtained values with the proposed approach. Graphics show the minimum, maximum and the average values reported in the reference of the horizontal axis. The values obtained in this study appear at the end of the graphic. In the horizontal axis also is indicated the CS characterized.

Even though the Young's modulus corresponding to the CS 01 (foundation) is not into the range of the reference values, results in Figs. 6, 7 and 8 show that the determined values in this study are consistent with those reported in the literature. Furthermore, this difference can be explained because the masonry of this CS was elaborated with a very compacted and resistant volcanic stone.

Conclusions

The proposed nondestructive method allows to determine in situ elastic properties of stone masonry. The approach is especially useful to characterize natural stone masonry of historical buildings, as the methodology does not produce damages on the masonry elements. Data produced with this methodology (Young's modulus, Poisson ratio and bulk density) are particularly valuable for structural engineers because they are the inputs for numerical simulations of the masonry historical buildings behavior.

Obtained results with the proposed NDM are consistent with data determined by destructive methods reported in the literature. However, experimental research is needed to compare resulted parameters on similar masonry samples, using standard destructive methods and the proposed method.

Table 2 Calculated velocity waves

Constructive system	Determinations	Velocity waves						V_s/V_p		
		V_p (m/s)			V_s (m/s)					
		Max	Min	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Ave
CS 01: Foundation	5	2130.9	1882.2	2001.9	1042.4	926.9	955.4	0.54	0.43	0.48
CS 02: Basement wall	8	1786.4	1265.6	1477.8	791.2	707.9	747.9	0.63	0.42	0.51
CS 03: Chapel's wall	4	682.5	583.5	637.5	413.3	330	370	0.62	0.48	0.58
CS 04: Nave's wall	2	959.3	830.7	895	500.5	493.6	497	0.6	0.51	0.56
CS 05: Façade wall, towers and dome	2	1345.8	1241.9	1293.9	709.4	600.1	654.7	0.57	0.45	0.51

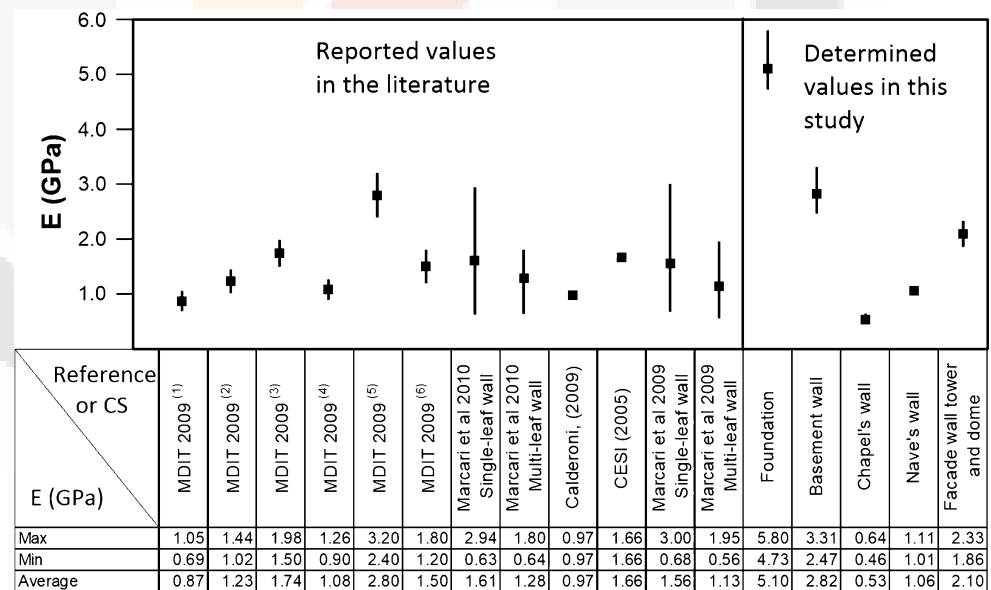
V_p P-wave velocity, V_s S-wave velocity, V_s/V_p P-wave and S-wave velocities ratio

Table 3 Computed mechanical properties with the proposed approach

Constructive system	Mechanical properties								
	ρ (kg/m ³)			E_d (Mpa)			ν		
	Max	Min	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Ave
CS 01: Foundation	2106	2042	2073	5800	4725	5103	0.38	0.3	0.35
CS 02: Basement wall	2015	1849	1919	3310	2470	2820	0.39	0.18	0.31
CS 03: Chapel's wall	1584	1524	1557	640	460	530	0.35	0.18	0.23
CS 04: Nave's wall	1725	1664	1695	1110	1010	1060	0.32	0.22	0.27
CS 05: Façade wall, towers and dome	1878	1840	1859	2330	1860	2100	0.38	0.26	0.32

ρ bulk density, E_d Young's modulus, ν Poisson ratio

Fig. 6 Comparison of Young's modulus of masonry reported in the literature and determined in this study. ⁽¹⁾ Disordered stone masonry (erratic and irregular stones); ⁽²⁾ masonry elaborated with stones coarsely cut; ⁽³⁾ masonry made with stones well overlapped each other; ⁽⁴⁾ soft stone block walls (tuff, calcarenite, etc.); ⁽⁵⁾ masonry walls elaborated with square stone blocks; ⁽⁶⁾ brick masonry walls with lime mortar



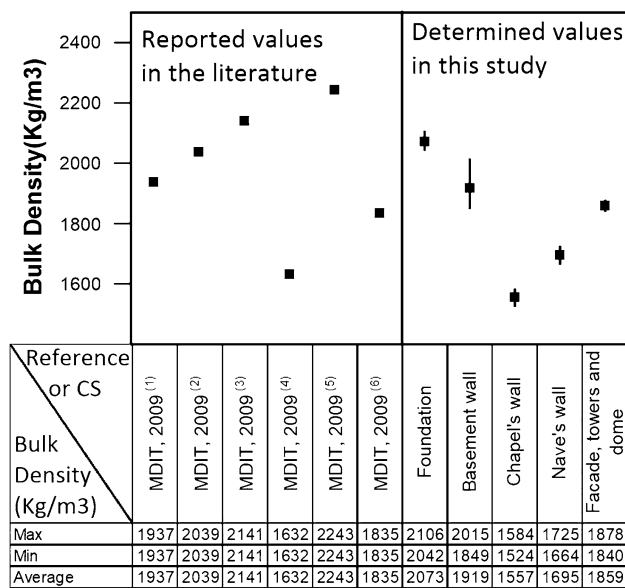


Fig. 7 Comparison of bulk density of masonry reported in the literature and determined in this study: ⁽¹⁾ Disordered stone masonry (erratic and irregular stones); ⁽²⁾ masonry elaborated with stones coarsely cut; ⁽³⁾ masonry made with stones well overlapped each other; ⁽⁴⁾ soft stone block walls (tuff, calcarenite, etc.); ⁽⁵⁾ masonry walls elaborated with square stone blocks; ⁽⁶⁾ brick masonry walls with lime mortar

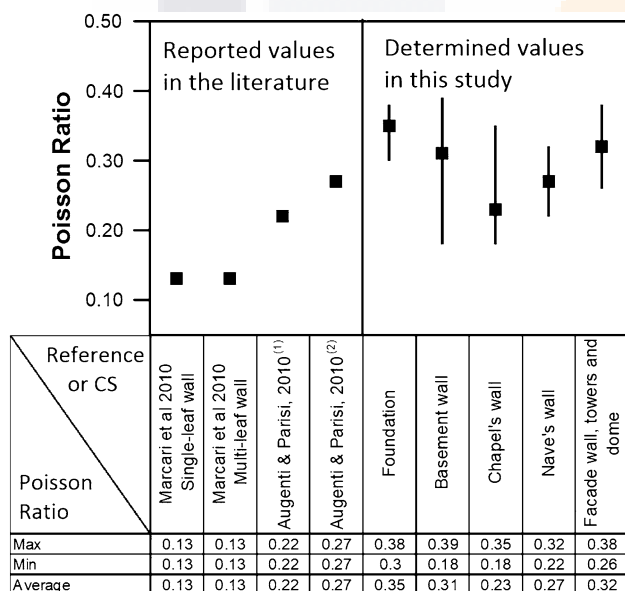


Fig. 8 Comparison of Poisson ratio of masonry reported in the literature and determined in this study: ⁽¹⁾ compression tests along the direction orthogonal to the bed joints, according to BS EN 1052-1 (1999); ⁽²⁾ compression tests along the direction orthogonal to the bed joints, according to ASTM E111-17 (2017)

Acknowledgements We appreciate the support of Armando Mendez during the experimental measurements taken in the temple. Also, we thank the Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for their support during the course of this investigation.

References

- Almeida C, Guedes JP, Arêde A et al (2012) Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Constr Build Mater* 30:188–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043>
- Arêde A, Costa C, Gomes AT et al (2017) Experimental characterization of the mechanical behaviour of components and materials of stone masonry railway bridges. *Constr Build Mater* 153:663–681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.069>
- ASTM E111-17 (2017) Standard test method for young's modulus, tangent modulus, and chord modulus. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/E0111-17>. <http://www.astm.org/>
- Augenti N, Parisi F (2010) Constitutive models for tuff masonry under uniaxial compression. *J Mater Civ Eng* 22:1102–1111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000119)
- BS EN 1052-1 (1999) British Standard. Methods of test for masonry—Part 1: Determination of compressive strength. CEN European Committee for Standardization. Central Secretariat: rue de Stasart 36, B-1050 Brussels, September, 1998. <https://standards.cen.eu/>
- Calderoni B, Cordasco EA, Guerriero L et al (2009) Mechanical behaviour of post-medieval tuff masonry of the Naples area. *J Int Mason Soc* 21(3):85–116
- Capozzoli L, Rizzo E (2017) Combined NDT techniques in civil engineering applications: laboratory and real test. *Constr Build Mater* 15:1139–1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.147>
- CESI 2005 (2005) Research project PON T.E.M.P.E.S.—tecnologie e materiali innovativi per la protezione sismica degli edifici storici
- Cook NGW (1992) Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 29(3):198–223. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)93656-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)93656-5)
- Eitzenberger A (2012) Wave propagation in rock and the influence of discontinuities. Doctoral thesis, Luleå University of Technology, Sweden
- Gardner GHF, Gardner LW, Gregory AR (1974) Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophys Soc Explor Geophys* 39(6):770–780
- GEOMETRICS (2016) Geode specifications. Specifications for seismometer Geode mode. In: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/geode/specifications/>. Accessed 10 Apr 2016
- Han D, Nur A, Morgan D (1986) Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophys Soc Explor Geophys* 51(11):2093–2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>
- Harvey D Jr, Schuller M (2010) Nondestructive evaluation: structural performance of masonry. Practice points 9, Association for Preservation Technology International, Illinois, United States of America
- Jafari S, Rots J, Esposito R, Messali F (2017) Characterizing the material properties of Dutch unreinforced masonry. *Procedia engineering*. International conference on analytical models and new concepts in concrete and masonry structures AMCM'2017, vol 193, pp 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.211>
- Jain A, Kathuria A, Kumar A et al (2013) Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in

- structure. *Procedia engineering*. The 2nd international conference on rehabilitation and maintenance in civil engineering (ICRMCE), vol 54, pp 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.022>
- Lee J-S, Yoon H-K (2014) Porosity estimation based on seismic wave velocity at shallow depths. *J Appl Geophys* 105:185–190. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.018>
- Magenes G, Penna A, Galasco A, Rota M (2010) Experimental characterisation of stone masonry mechanical properties. In: *Proceedings of the eight international masonry conference*. International Masonry Society, Technische Univesität Dresden, Dresden, Germany
- Marcari G, Fabbrocino G, Lourenço PB (2009) Investigation on compressive behaviour of tuff masonry panels. In: *Atti del workshop wonder masonry 2009*, University of Florence. Polistampa, Florence, Italy
- Marcari G, Fabbrocino G, Lourenço PB (2010) Mechanical properties of tuff and calcarenite stone masonry panels under compression. In: *Proceedings of the eight international masonry conference*. International Masonry Society; Technische Univesität Dresden., Dresden, Germany
- McCann DM, Entwisle DC (1992) Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs. *Geol Soc Lond Spec Publ* 65:317–325. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.065.01.24>
- McCann DM, Forde MC (2001) Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT and E Int* 34(2):71–84. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
- MDTI (2009) Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Circolare 2 febbraio 2009, n. 617. Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. *Gazzetta Uff*. 446
- Navarro-Hernandez M (2013) Geometric and damage survey of San Antonio temple and structural analysis of the real situation (In Spanish). M. Eng. thesis, Universidad Autónoma de Aguascalientes
- Oliveira D (2000) Mechanical characterization of stone and brick masonry. University of Minho, Guimaraes, Portugal. Report 00-DEC/E-4
- Orenday-Tapia E (2016) Study of the characterization of the mechanical properties of the San Antonio Temple for its dynamic analysis (In Spanish). M. Eng. thesis. Universidad Autónoma de Aguascalientes
- Reyes-Rodriguez A (2013) Refugio Reyes, a life. The learning (In Spanish). National Council for Culture and the Arts, CONACULTA, Aguascalientes
- Schuck DA, Lange G (2007) Seismic methods. *Environmental geology*. Springer Berlin Heidelberg, pp 337–402. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_11
- Schuller MP (2003) Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. *Prog Struct Mater Eng* 5:239–251. <https://doi.org/10.1002/pse.160>
- Schuller MP (2006) Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. In: B. Kasal, R. Anthony, M. Drdacky (eds) *RILEM/NSF international engineering research and education workshop "in-situ evaluation of masonry and wood historic structures: challenges and opportunities"*. RILEM Publications SARL, pp 67–86
- Sheriff RE, Geldart LP (1995) *Exploration seismology*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge
- Vasanelli E, Colangiuli D, Calia A et al (2015) Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics* 60:33–40. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.010>
- Vasanelli E, Calia A, Colangiuli D et al (2016) Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units. *Constr Build Mater* 124:575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.130>
- Vasanelli E, Colangiuli D, Calia A et al (2017) Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries. *Constr Build Mater* 146:744–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.146>
- Vekey RC (1988) *IBMAC 1988*. In: 8th International brick and block masonry conference. Dublin, Ireland, pp 1673–1681

CAPÍTULO III.

**CHARACTERIZATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF
ANCIENT MASONRY FROM A NON-DESTRUCTIVE METHOD IN
SITU**

Rafael Aguilar · Daniel Gervásio ·
Suzana Moreira · Miguel A. Pardo
Luis E. Romero · Editors

Structural Analysis of Historical Constructions

An Interdisciplinary Approach



 Springer



Characterization of the Mechanical Properties of Ancient Masonry from a Non-destructive Method *In Situ*

Edith Estefanía Orenday-Tapia¹(✉), Jesús Pacheco-Martínez²,
Raudel Padilla-Ceniceros², Héctor Ánimas-Rivera³,
José Ángel Ortiz-Lozano², and Daniel Gaxiola-Apodaca⁴

¹ Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico
eeorenday@gmail.com

² Department of Construction and Structures, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico
jesus.pacheco@edu.uaa.mx,
raudelpc@gmail.com, jose.ortiz.lozano@gmail.com

³ Instituto Tecnológico Superior de Fresnillo, Fresnillo, Mexico
hectoranimas@hotmail.com

⁴ Maestría en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico
gaxiola_ad@live.com

Abstract. This paper presents a methodology for determining the mechanical properties of the masonry elements by mean of seismic techniques and how these are included in a numerical model of a case study of a building. This work presents partial results of a research in process of doctoral thesis. It is part of the line of Non-Destructive Test (NDT) *in situ* that uses the measuring of seismic waves travel time to obtain shear and compressional waves; with these parameters it is possible to obtain the mechanical properties of the masonry of ancient buildings as Young's Module, Poisson Ratio and density. The obtained data comes from a case study, the Temple of San Antonio de Padua, located in Aguascalientes, Mexico. In addition, a numerical model developed in SAP2000 is presented with the characterized properties obtained from the analysis. Results of this research will contribute future numerical analysis because it will be possible to obtain the values of each part of the building, and in this way, offer more reliable information about the behavior of the building.

Keywords: Mechanical characterization of masonry
Non-destructive test · *In Situ* testing · Seismological exploration
Dynamic elastic properties · Velocity waves

1 Introduction

One of the most important issues for the heritage conservation work is to ensure the structural stability of the buildings. To achieve this objective it is essential to have information about the building as the strength of the masonry [1] and the values of its mechanical properties as Shear and Young's Module, Poisson Ratio and density; these values are the input data for the parameters of the materials when a structural analysis is conducted. It is necessary to have representative mechanical properties to obtain reliable results of the behavior of a building when numerical models are used as tools to evaluate it. [2, 3]. However, to characterize the mechanical properties in historical buildings is a complex task due that the building has restrictions for its heritage value; this is why destructive and invasive tests *in situ* are prohibited.

Most of the heritage buildings around the world have been erected using stone masonry as main material for structural and ornamental elements. The masonry as main material is a heterogeneous, orthotropic [4] and anisotropic composite; therefore, the mechanical properties of the mortar and the rocks influence the mechanical properties as a composite material [2, 5].

The objectives of this study are (1) To find a method that provides information about mechanical properties of the masonry of the building as a composite material without putting in risk any part of it and (2) To evaluate the building *in situ*.

NDT are used to obtain information about the materials and structures of the buildings as its shape (internal or external configuration) and its properties without causing damage. [6]. Some are directed to obtain qualitative information about the physical characteristics as voids, deterioration, weakness or, to reveal anomalies in the masonry structures; some examples of these are Rebound Hardness, Impact-Echo, Stress Wave Transmission, Topographic Imaging, Infrared Thermography, Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography [7–9].

Using the Vertical and Diagonal Compression Tests on masonry specimens, [5, 10] elastic properties could be obtained as Young Module and Poisson Ratio. However these are Destructive Tests (DT), so they must not be used in heritage buildings; other tests as Flat-Jack estimate the stress and deformability properties of masonry *in situ* [2, 8], nevertheless its methodology damage the stone because it is a semi-invasive method. Additionally, the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) tests obtain the Elastic Module in concrete structures [6, 11–14]; but the use of it has not been applied successfully in stone masonry structures as a composite; it has been used in cores of rocks and mortar.

The Seismological Exploration (SE) is a geophysical method that measures elastic waves generated to obtain data about the subsoil composition as the configuration of its substrates and mechanical properties [15]. The velocity of the wave depends on the density of the material and its elastic properties. Studies have applied this method to obtain qualitative information of the masonry as voids or gaps in the structures [8], but it has been found that mechanical properties of masonry as a composite material could be obtained without putting in risk any part of the building [16]. This involves the measurement of the travel time of induced waves through a material; with the subsequent calculation of velocity waves it is possible to associate the dynamic stiffness (Dynamic Young Module), Poisson Ratio and density of the materials as a composite material.

2 Theory

Through the propagation of the velocity of Compressional Waves (V_p) and Shear Waves (V_s) dynamic elastic properties could be determined by the Elasticity Theory [15, 17, 18]. Factors as density, porosity, depth, lithology, cementation, age, lithostatic pressure and interstitial fluids influence the velocity propagation of elastic waves through natural rock formations [15, 19–22]. Thus these factors are present on the rocks that are used to construct historical buildings. The use of the travel time measurements of seismic waves allows to determine information of mechanical properties of the masonry that are needed to conduct numerical models. Once measured V_p and V_s of each constructive system elasticity equations are used to obtain the Elastic Lammé Constants (λ and μ) that could be calculated using Eqs. (1) and (2).

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (2)$$

Masonry Density (ρ) could be determined using Eq. (3) [23].

$$\rho = 0.31 V_p^{1/4} \quad (3)$$

Equations (4) and (5) correlate the Elastic Dynamic Module (E_d) and Poisson Ratio (ν) with the V_p and V_s according to the Elasticity Theory.

$$E_d = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (5)$$

3 Methodology

The SE method consists on the measure of V_p and V_s to register the travel path of the elastic waves. Horizontal uniaxial velocity sensors are placed on specific distances depending on the element to be characterized (for this study they were placed 0.30 and 0.60 meters between each other) along a linear arrangement on the masonry element (See Fig. 1). These sensors were connected to a Seismometer Geode from Geometrics as a recorder unit and a laptop to control the data acquisition.

To generate the waves in a controlled way, the masonry elements were hit with a hammer of two pounds, creating a dynamic pulse (it is important to mention that the distance between the hit and each sensor was not previously defined because there were

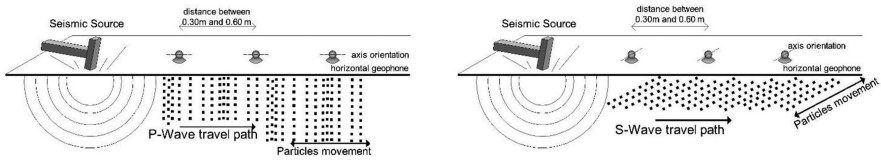


Fig. 1. Scheme of the linear arrangement of the velocity sensors used to record P-wave and S-wave

variations on the architectonic characteristics of each constructive system). The measurements were obtained placing the axis of the sensors normal to the wave path in order to register the horizontal component of V_s and with its axis aligned to the wave path to register V_p (See Fig. 1). The velocity waves (V_p and V_s) could be obtained knowing the distance between each sensor and the place of the hit, and recording the time that takes to the elastic wave to travel from the hit spot to each velocity sensor place.

Arrival time of the P-wave and S-wave could be identified in the seismogram generated with the seismograph. Figure 2 shows the register of the arrangement of the P-wave and S-wave in the survey. P-wave arrival time is the first break after the straight line in the seismic register. S-wave arrival is identified as an amplitude increase in the graphic after the first break. Once the velocity of P and S waves of each constructive system is calculated the mechanical properties could be determined as a composite material using the elasticity formulas (Eqs. 1 to 5).

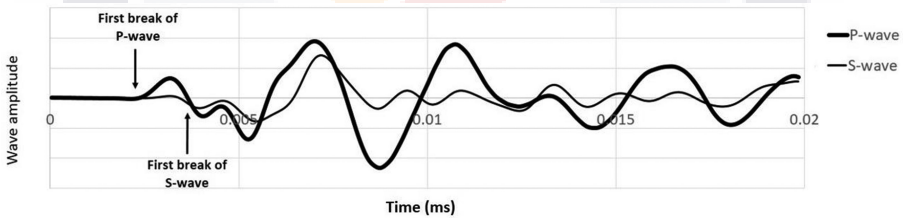


Fig. 2. Example of the identification of P-wave and S-wave in a produced seismograph

4 The Case Study: Temple of San Antonio de Padua

The Temple of San Antonio de Padua is located in the historical center of Aguascalientes, Mexico. It possesses an eclectic style, which means that it has several architectural styles such as Neo-Renaissance, Neo-Baroque, Neo-Gothic, Neo-Classical, Arabic, Russian and others. It was built between 1895 and 1908; and it was designed by the autodidact architect Refugio Reyes [24].

This building is classified for this study in six constructive systems [16, 25, 26] according to the characteristics of the rocks, the joints, the configuration and its location. This classification includes all the masonry walls systems and the roof system

of the building. Figure 3 shows the location of the six constructive systems. Its structure is based on un-reinforcement load-bearing walls, arcs and columns of masonry of different quarry of fine-grained sandstone joined with mortar of sand and lime, the domes and vaults are made of clay-bricks, and the facade is constructed with quarry stone of three different colors: green, yellow and pink [25].

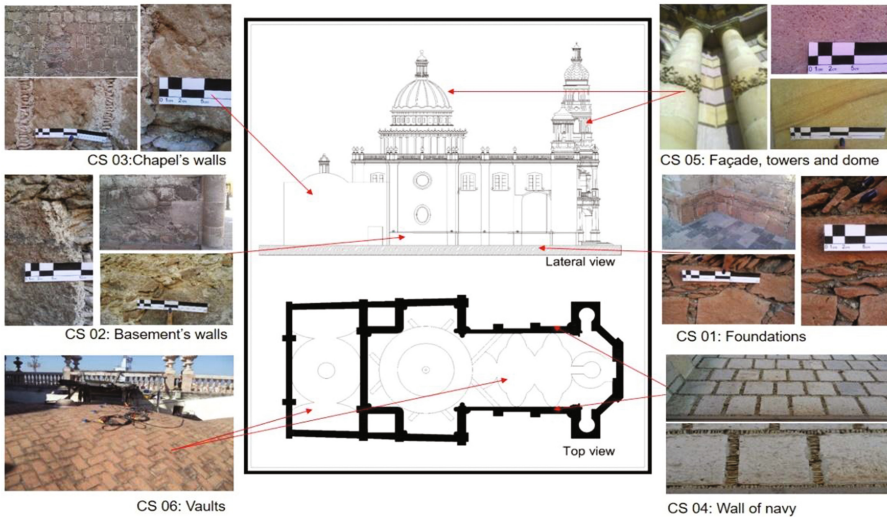


Fig. 3. Location of the six constructive systems and the rocks of its masonry

Table 1 shows the average of the obtained results from the analysis. The first column contains the classification of the constructive systems; the second presents the velocity of P-wave and S-wave; and the third the mechanical properties of each constructive system; ρ refers to density, E_d refers to the Dynamic Young's Module and ν to the Poisson Ratio.

As it is shown, the values of the parameters of each constructive system have significant differences, which is congruent with the type of rock composing the masonry. In general, elements as the foundations, which more consolidated and harder rocks have higher values than those elements as walls, which have softer and less resistant rocks. On the other hand, elements as vaults have high values because of their constructive system; Mexican vaults often are constructed with a shell of brick, electrowelded mesh and a mortar layer [27]. In the Temple of San Antonio it is also observed another layer of brick at the top of the vaults (ceramic material with high density), placed where the geophysical surveys were conducted.

For more details about the case study and the methodology implemented in each constructive system it is suggested to read *"In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry"* [16].

Table 1. Results of the mechanical properties of the characterization

Constructive system	Velocity wave		Mechanical properties		
	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	E_d (MPa)	ν
CS01: Foundation	2002	955	2060	5,103	0.32
CS02: Basement's wall	1478	748	1920	2,820	0.31
CS03: Chapel's wall	638	370	1560	530	0.23
CS04: Nave's wall	895	497	1690	1,060	0.27
CS05: Façade's wall, towers and dome	1294	655	1860	2,100	0.32
CS06: Vaults	2313	1001	2150	5,980	0.38

5 Application of the Obtained Results in a Numerical Model

Nowadays, the use of structural analysis programs that apply the Finite Element Method (FEM) allows to conduct complex structural analysis. However, to guarantee that the obtained results from the numerical analysis corresponds to the behavior of the building it is necessary to ensure that the geometry and the discretization based on properties of each constructive system correspond to the real building [2, 3]. Figure 4 shows the discretized building based on the identified constructive systems with the correspond properties.

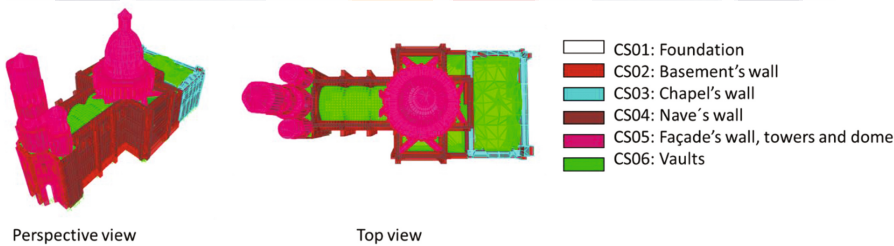


Fig. 4. Localization of the characterized constructive systems of the building

Figure 5 presents the sequence followed for the structural analysis in the case study. Figure 5a presents the Temple of San Antonio de Padua. A survey was previously conducted to obtain the geometry of the building using a total station (See Fig. 5b); this survey was conducted with the collaboration of the Council of the City. After that, the identification and the classification of the constructive systems was conducted based on the type of rock and the arrangement of the masonry elements to determine the mechanical properties as it was previously described (See Fig. 5c). The model for the numerical analysis was elaborated through a lineal elastic structural analysis based on Shell elements in SAP2000. Finally, a self-weight analysis was developed (See Fig. 5d).

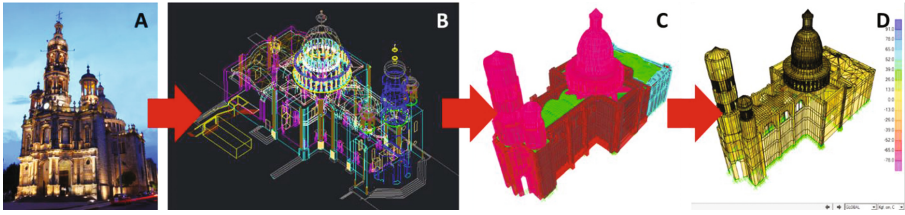


Fig. 5. (a) View of the Temple of San Antonio de Padua; (b) View of the topographic survey; (c) Localization of characterized constructive systems of the building; (d) Results of the shell stress analysis

6 Conclusion

The proposed method in this paper is inserted into the research line from the NDT, which allows to obtain the elastic mechanical properties of the masonry as Young Module, Poisson Ratio and density; these parameters are the necessary information to conduct a structural analysis by numeric simulations. The obtained values of the characterization include the influence of all existent materials in the place where the waves are propagated; it means that the characterized values have the influence of the masonry as a unit (mortar and rocks); therefore, they represent the properties of the masonry as a whole. It is important to mention that the mechanical behavior of these properties is in the linear and elastic range, because the equations used are derived from the Elasticity Theory; this implies that masonry follows Hooke's Law.

One of the advantages of this method is that it could be used in heritage buildings because it does not damage the elements to be characterized; a dynamic impulse (in this case the hammer hit on the surface of the element) is just required to characterize it.

The classification of the constructive systems was conducted according to two criteria; (1) Physical characteristics of the rocks and its bonding and (2) Location of the elements and structural functions in the building. A comparison to verify the obtained values of the characterization with the Seismological Method was made between the values of the survey and the reported in the literature [16]. This comparison shows that the determined values are consistent with the reported ones; however, it is necessary to make more surveys to verify if the obtained results with this method are reliable in all the cases; future surveys could present a comparison between standardized methods and this method.

The Elastic Module produced with this method is a Dynamic Module E_d ; the Theory of Elasticity states that the Dynamic Module E_d it is higher than the Elastic Static Module. According to [28–30] the relation between the Dynamic Elastic Module and the Static Elastic Module varies from 7–10. However, literature reports values similar to the ones obtained with the geophysical method without transformation; so it is necessary to conduct more surveys to obtain information about these differences.

Results of this research will contribute future numerical analyses because it will be possible to obtain the values of each part of the building; this will mean that values will be closer to the real ones. In this way, they will offer more reliable information about

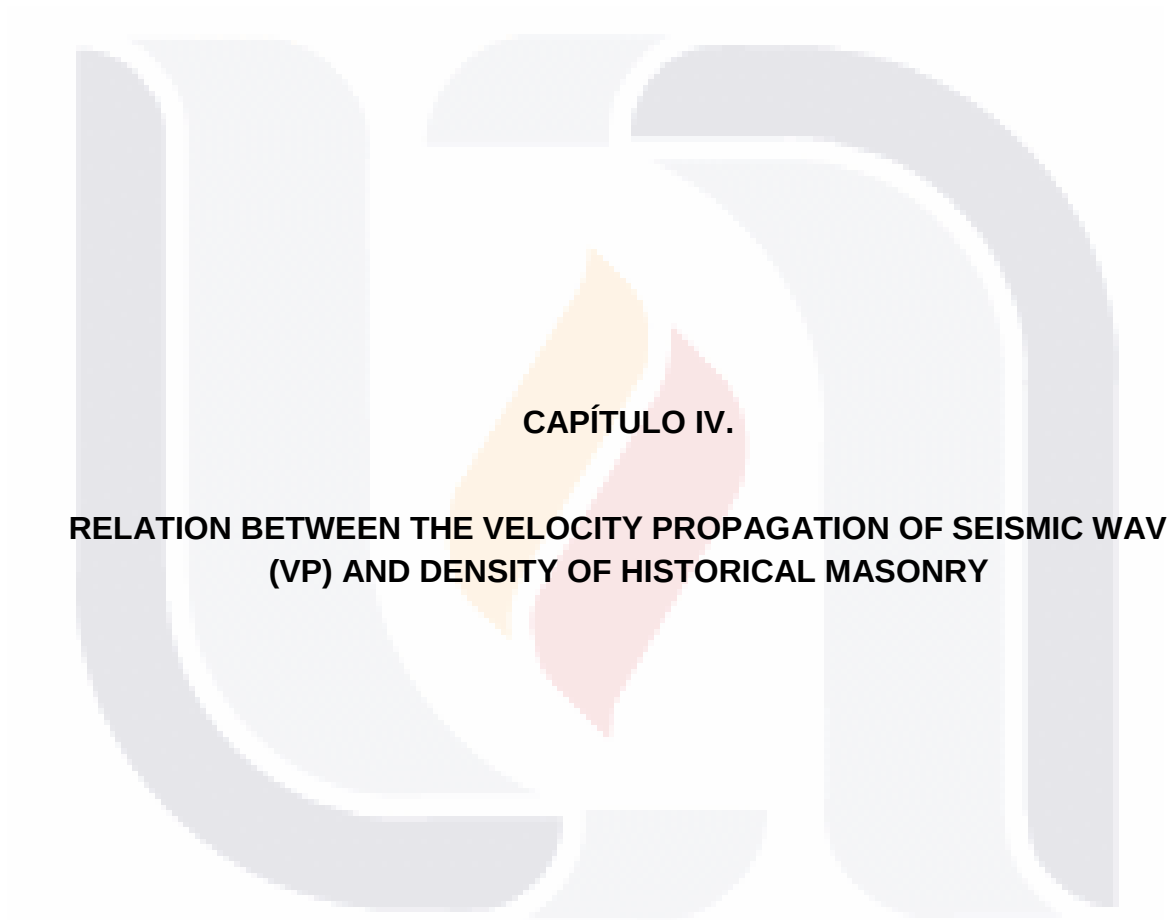
the behavior of the building. This is an advantage because in the majority of the cases, the properties of the materials of the heritage building are unknown.

Acknowledgments. We thank the Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for their support during this research.

References

1. Harvey Jr D, Schuller M (2010) Nondestructive evaluation: structural performance of masonry. Practice points 9, Association for Preservation Technology International, Illinois, United States of America
2. Arêde A, Costa C, Gomes AT et al (2017) Experimental characterization of the mechanical behaviour of components and materials of stone masonry railway bridges. *Constr Build Mater* 153:663–681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.069>
3. Oliveira D (2000) Mechanical characterization of stone and brick masonry. University of Minho, Guimaraes, Portugal, Report 00-DEC/E-4
4. Jafari S, Rots J, Esposito R, Messali F (2017) Characterizing the material properties of dutch unreinforced masonry. In: *Procedia engineering. international conference on analytical models and new concepts in concrete and masonry structures, AMCM 2017*, vol 193, pp 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.211>
5. Almeida C, Guedes JP, Arêde A et al (2012) Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Constr Build Mater* 30:188–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043>
6. Vekey RC (1988) Non-destructive test methods for masonry structures. In: *IBMAC 1988: 8th international brick and block masonry conference*, pp 1673–1681
7. McCann DM, Forde MC (2001) Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT E Int* 34:71–84. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
8. Schuller MP (2003) Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. *Prog Struct Eng Mater* 5:239–251. <https://doi.org/10.1002/pse.160>
9. Capozzoli L, Rizzo E (2017) Combined NDT techniques in civil engineering applications: laboratory and real test. *Constr Build Mater* 15:1139–1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.147>
10. Magenes G, Penna A, Galasco A, Rota M (2010) Experimental characterization of stone masonry mechanical properties. In: Jäger W, Haseltine B, Anton F (eds) *Proceedings of the eight international masonry conference. International Masonry Society; Dresden, Germany*
11. Jain A, Kathuria A, Kumar A et al (2013) Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in structure. In: *Procedia Eng. the 2nd international conference on rehabilitation and maintenance in civil engineering (ICRMCE)*, vol 54, pp 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.022>
12. Vasanelli E, Colangiuli D, Calia A et al (2015) Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics* 60:33–40. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.010>
13. Vasanelli E, Calia A, Colangiuli D et al (2016) Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units. *Constr Build Mater* 124:575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.130>

14. Vasaneli E, Colangiuli D, Calia A et al (2017) Combining non-invasive techniques for reliable prediction of soft stone strength in historic masonries. *Constr Build Mater* 146:744–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.146>
15. Sheriff RE, Geldart LP (1991) Exploración sísmológica. Vol I.- Historia, teoría y obtención de datos., Firts. LIMUSA, S.A. de C.V., Mexico
16. Orenday-Tapia EE, Pacheco-Martínez J, Padilla-Ceniceros R, López-Doncel RA (2018) In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry. *Environ Earth Sci* 77:286. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7473-8>
17. McCann DM, Entwisle DC (1992) Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs. *Geol Soc Lond Spec Publ* 65:317–325. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.065.01.24>
18. Schuck A, Lange G (2007) Seismic methods. *Environ Geol*, 337–402. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_11
19. Han D, Nur A, Morgan D (1986) Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophys. Soc. Explor. Geophys.* 51(11):2093–2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>
20. Cook N (1992) Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 29(3):198–223. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91656-P](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91656-P)
21. Eitzenberger A (2012) Wave propagation in rock and the influence of discontinuities. Doctoral thesis, Luleå University of Technology, Sweden
22. Lee JS, Yoon HK (2014) Porosity estimation based on seismic wave velocity at shallow depths. *J Appl Geophys* 105:185–190. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.03.018>
23. Gardner GHF, Gardner LW, Gregory AR (1974) Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophys Soc Explor Geophys* 39(6):770–780
24. Reyes A (2013) Refugio Reyes, una vida. El Aprendizaje. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, CONACULTA, Aguascalientes, México
25. Navarro M (2013) Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual. Master thesis, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico
26. Orenday E (2016) Estudio de caracterización de las propiedades mecánicas del Templo de San Antonio para su análisis dinámico. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico
27. Morales RA (2007) Bóvedas mexicanas
28. Nie YJ (1988) Evaluation of dynamic compaction by elastic wave method. *J Hydrosoci Eng* 2:55–65
29. Zhen YL, Xia SY (1997) The study on the dynamic modulus of geomaterials. *Chin J Geotech Eng* 1:75–78
30. Qian JH, Qian XD, Zhao WB (1986) Theory and practice of dynamic consolidation. *Chin J Geotech Eng* 6:26–30



CAPÍTULO IV.

RELATION BETWEEN THE VELOCITY PROPAGATION OF SEISMIC WAVE (VP) AND DENSITY OF HISTORICAL MASONRY



Volume 248, 10 July 2020

ISSN 0950-0618

Construction and Building MATERIALS

*An International Journal
Dedicated to the Investigation
and Innovative Use of
Materials in Construction
and Repair*

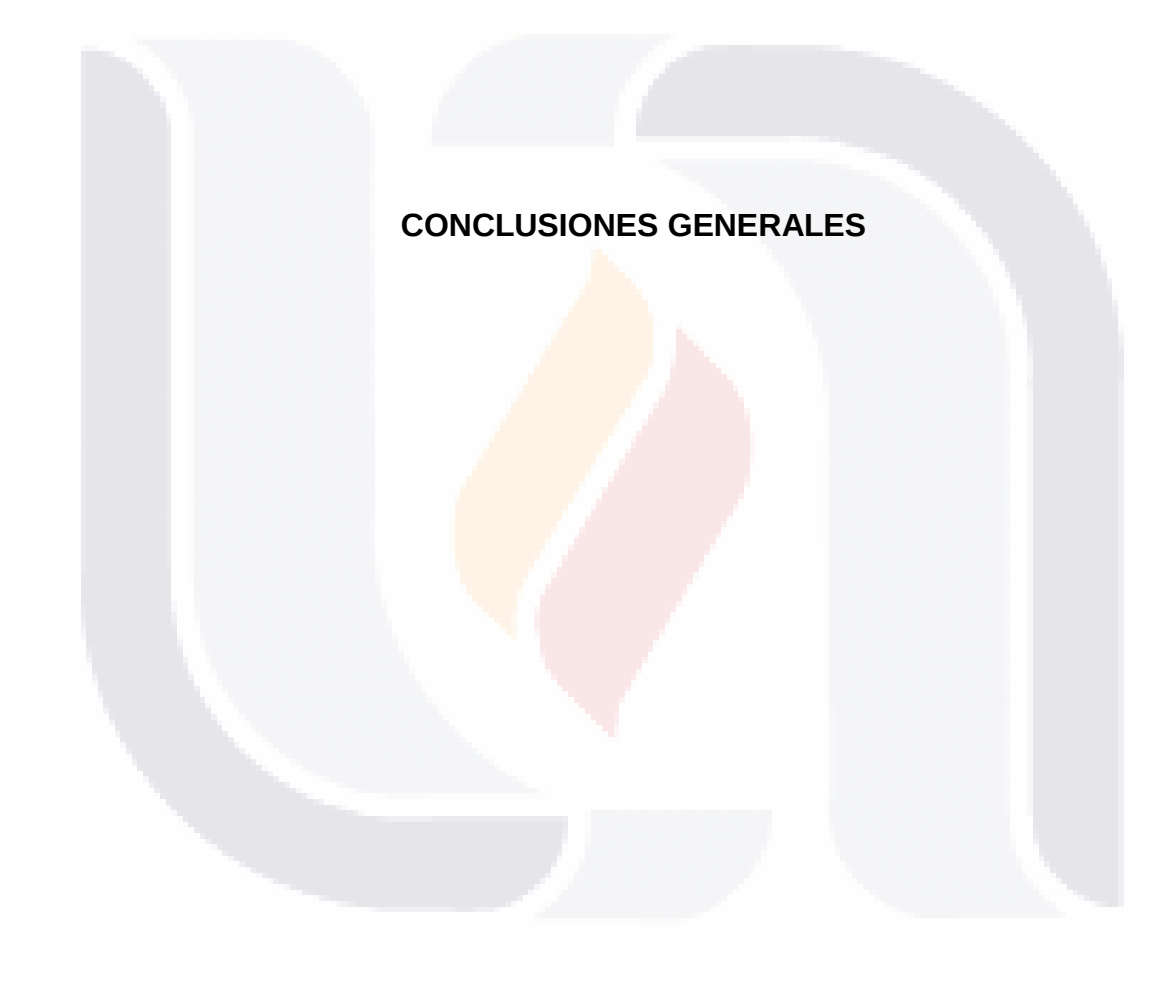
Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Construction and Building Materials

Relation between the velocity propagation of seismic wave (V_p) and density of historical masonry --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	CONBUILDMAT-D-20-05667
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Seismic Method; P wave; Density; Gardner's Relation; Tests in situ; Laboratory tests; Masonry; Historical buildings; regression analysis
Corresponding Author:	Jesús Pacheco-Martínez Aguascalientes, MEXICO
First Author:	Edith Estefanía Orenday-Tapia, Ph.D.
Order of Authors:	Edith Estefanía Orenday-Tapia, Ph.D. Marcos Mauricio Chávez-Cano, Ph.D. Jesús Pacheco-Martínez, Ph.D. Silvia Rodríguez-Narciso, Ph.D. Guillermo Martínez-Ruiz, Ph.D. Rubén Alfonso López-Doncel, Ph.D. Raudel Padilla-Ceniceros, Ph.D.
Abstract:	The main objective of this paper was to find a relation between the velocity propagation of seismic wave and the density of the historical masonry. To obtain this information, a testing program was performed to measure the velocity of the waves in samples of a laboratory of different types of masonry and in situ from structural elements of a scale model church. According with the velocities measured and the Gardner's Relation, the density of the masonry was calculated. Also, a regression model to estimate the density was obtained from the measured velocity waves. Two analyses were conducted to obtain an adequate approximation of the density of the masonry. The first was a comparison between the density measured and the density calculated using the Gardner's Relation. The second was a comparison of the density measured and the density calculated using the proposal model.
Suggested Reviewers:	Fernando Peña Mondragón, Ph. D. Universidad Nacional Autonoma de Mexico Instituto de Ingenieria fpem@pumas.iingen.unam.mx Angela Calia a.calia@ibam.cnr.it Enzo Rizzo enzo.rizzo@imaa.cnr.it Luigi Capozzoli capozzoli.l@irea.cnr.it Luís Sousa lsousa@utad.pt



CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo de la investigación que se presenta consistió en determinar si el método sísmico, que utiliza la medición de las velocidades de onda de cuerpo (P y S), puede ser utilizado como una herramienta que permita obtener información de las propiedades mecánicas de la mampostería, sin causar daño en el elemento que se desee determinar.

Específicamente, se planteó que el método pudiera ser utilizado *in situ*, sobre todo en edificios históricos. Ya que debido al valor histórico que estos edificios poseen, no permiten que las pruebas tradicionales, que generalmente son pruebas destructivas o de extracción de muestras, puedan realizarse sobre estas estructuras.

El contenido de este trabajo incluye tres artículos científicos, y un capítulo de libro, partiendo de lo general a lo particular. Desde la justificación y el estado del arte, siguiendo por la primera campaña experimental realizada en un templo de la ciudad de Aguascalientes, hasta una campaña experimental realizada en el IIUNAM.

Dentro de los hallazgos importantes se mencionan que:

1. En la ciudad de Aguascalientes existe un arraigo importante en la religiosidad que profesan sus ciudadanos. Esta es la razón por la cual se han llevado a cabo numerosos estudios de diversa índole (socioculturales, de arquitectura, de ingeniería) sobre los edificios históricos religiosos, con el objetivo de que estos sean preservados a las generaciones futuras.
2. De la clasificación de los valores que poseen las estructuras históricas, se propone agregar dentro de los valores intrínsecos (los que son inherentes a la estructura, pero no de manera tangible), el valor sociocultural, que, en el caso de los edificios históricos religiosos, se refiere a la identidad religiosa, de ahí la importancia de diagnosticar los edificios históricos religiosos de Aguascalientes.
3. Se sistematizan los estudios que se realizaron en la Universidad Autónoma de Aguascalientes desde el ámbito de la ingeniería, llevados a cabo en los dos templos más importantes de la ciudad de Aguascalientes, La Catedral y el Templo de San Antonio de Padua, y que utilizaron NDT para su evaluación. En este análisis se clasificó en diagnósticos cualitativos (observación de patologías y fotogrametría) y cuantitativos (Deterioro de la mampostería, caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería, análisis estructural por modelos numéricos y la caracterización dinámica de los edificios).

-
4. La medición de la propagación de onda se utilizó para obtener algunas propiedades de la mampostería. En el templo de San Antonio se realizó la medición en los elementos estructurales, utilizando un arreglo lineal. Posteriormente se utilizó la Relación de Gardner y la Teoría Elástica y se obtuvieron valores como la densidad, el módulo de Young y la Relación de Poisson.
 5. Los valores obtenidos en las mediciones del templo de San Antonio fueron comparados con valores obtenidos de la literatura, de mampostería similar, observándose que no estaban alejados unos de otros.
 6. De la campaña experimental llevada a cabo en el IIUNAM, las mediciones *in situ* (templo a escala) y sobre especímenes de laboratorio (tabique, templo a escala y templos de Morelos), se obtuvieron las velocidades de onda P y se calculó la densidad utilizando la Relación de Gardner. Se observó que esta fórmula permitía determinar con aproximación la densidad de la mampostería en la mayoría de los casos.
 7. Se propone un modelo estadístico, el cual permite obtener valores de la densidad de la mampostería con un porcentaje de error menor al 18%.
 8. Los resultados de todas las campañas experimentales arrojaron que el método da información más confiable, cuando se realiza *in situ*.
 9. El método sísmico, permite obtener información si causar daño en los elementos estructurales, lo cual, lo hace una herramienta que puede utilizarse para la evaluación de los edificios históricos.
 10. Los parámetros obtenidos, podrán ser utilizados al momento de realizar una evaluación de un edificio mediante un modelo numérico.