

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MAMPOSTERÍA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS EMPLEANDO MÉTODOS SÍSMICOS NO DESTRUCTIVOS *IN SITU*.

El caso del templo de San Antonio de Padua

Edith Estefanía Orenday Tapia¹

Jesús Pacheco Martínez²

Resumen

Es importante conocer las propiedades mecánicas de los materiales con los que un edificio patrimonial está construido para aseverar que los resultados que se obtengan correspondan a los de la estructura real. Sin embargo, es difícil determinar las características de los materiales de estos edificios por dos motivos; el primero se debe a la complejidad del sistema constructivo del edificio, pues en la mayoría de los casos están hechos de mampostería. El segundo, por las limitantes de trabajar con este tipo de edificios, pues se evita ponerlo en riesgo o dañar alguna de sus partes.

Debido a las razones previamente mencionadas, se han buscado nuevas maneras de determinar las propiedades mecánicas de los materiales con los que los edificios están construidos. La metodología que se propone, se inserta en esta línea de investigación, en donde se utiliza el estudio de la propagación de ondas sísmicas como un método no destructivo para la caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería. Se presentará el caso del templo de San Antonio de Padua en Aguascalientes, Ags., como ejemplo de aplicación.

Palabras clave: *Templo de San Antonio, caracterización de las propiedades mecánicas, métodos no destructivos, método de exploración sísmológica, mampostería antigua.*

1 Estudiante del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción. eeorenday@gmail.com

2 Doctor en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Departamento de Construcción y Estructuras. jesus.pacheco@edu.uaa.mx

Abstract

It is important to know the mechanical properties of the materials used in a heritage building, to ensure that the obtained results correspond to the real structure. However, it is difficult to determine the characteristics of the materials of these buildings because of two reasons, the first is because complexity of the constructive system of the building, because in the majority of the cases buildings are made of masonry, the second, because of the limitations of working with this kind of buildings because the objective is not to put them in risk or damage parts of them.

Because of the reasons previously mentioned, new ways for determining its mechanical properties are been looking for. The methodology is part of this line of research, in which the study of the seismic wave transmission is used as a non-destructive method for the characterization of the mechanical properties of the masonry. The case of the Temple of San Antonio de Padua in Aguascalientes, Ags. (México) will be presented as an example of the implementation.

Keywords: *Temple of San Antonio, characterization of the mechanical properties, non-destructive methods, exploration seismology method, heritage masonry.*

Introducción

Una gran parte de la historia se encuentra materializada en la arquitectura; por ello, el hombre ha tratado de preservarla para generaciones futuras. Actualmente, diversas instituciones trabajan desde distintas perspectivas del conocimiento para lograr este fin.

Es desde el punto de vista de la ingeniería estructural, que diversos estudios han enfocado sus esfuerzos en la determinación de la salud del edificio, para así evaluar su estado actual y su capacidad para resistir eventos con el fin de garantizar su preservación (Animas *et al.*, 2013). Sin embargo, debido al valor histórico-patrimonial que tienen este tipo de edificios, no pueden ser evaluados mediante métodos convencionales, que generalmente son técnicas invasivas o destructivas.

Ante esta problemática, surgen las pruebas no destructivas para la evaluación de la salud estructural de un edificio (Animas, Pacheco y Ortiz, 2014), que se refiere al proceso de inspección o evaluación de los materiales, sin destruir o hacer inservible una parte o la totalidad de una edificación (ASNT, 2015). El uso más común de este tipo de pruebas es para determinar o caracterizar las propiedades físicas de los materiales, con los que posteriormente se alimentará un modelo numérico para, de

esta manera, asegurar que los resultados obtenidos del análisis, representen el estado real de la edificación (Animas y Pacheco, 2015).

Sin embargo, hablar de la determinación de las propiedades mecánicas de un edificio patrimonial es una tarea compleja; por un lado, por la falta de información de los materiales con los que está construido; por otro, por la complejidad de su sistema constructivo, que en la mayoría de los casos es a base de mampostería; y por último, es que aun conociendo las propiedades mecánicas iniciales de los materiales con los que fue construido; no existe una fórmula o método para determinar el grado de degradación que experimentan dichos materiales por efecto de la intemperie y las actividades antropogénicas a las que están expuestos.

Consideraciones

La mayoría de los edificios históricos están contruidos de mampostería, que es un material resultante de la unión de piezas formadas por distintos materiales, naturales o artificiales, que pueden o no estar unidas con un mortero y que influye en las características mecánicas del elemento estructural que se forma (Esquivel, 2010).

Aunque la mampostería es un material compuesto, en este estudio se asumen las siguientes consideraciones simplificadoras: uno, la mampostería tiene una distribución uniforme de sus componentes (piedra y mortero), y tiene las mismas propiedades en todas las direcciones (material homogéneo e isotrópico), por lo cual se considera que los valores determinados de las propiedades mecánicas de la mampostería son la aportación de cada una de las partes que componen la mampostería (piedras y juntas de mortero); dos, el material sigue la Ley de Hooke (material lineal y elástico), es decir la relación entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias que experimenta la mampostería tienen una constante de proporcionalidad que es el Módulo de Young o módulo de Elasticidad (Gere y Goodno, 2010).

Para caracterizar la mampostería se midieron los tiempos de viaje de las ondas elásticas generadas artificialmente para determinar la velocidad de propagación de las ondas de cortante y compresión. Éste es el mismo principio usado en geotecnia para obtener datos acerca de la composición del subsuelo (Sheriff y Geldart, 1991). Al determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas a través de material, es posible determinar las propiedades elásticas de dicho material a través de las ecuaciones de la teoría elástica.

El procedimiento general del método consiste en medir el paso de ondas sísmicas con sismómetros (geófonos). Si se conoce el tiempo de arribo de la onda a los geófonos, y la distancia entre la fuente y el geófono, puede conocerse la velocidad a la que viaja la onda. Posteriormente, haciendo

uso de las fórmulas de la elasticidad y de la ecuación de propagación de ondas (Sheriff & Geldart, 1991), se puede obtener las propiedades mecánicas de la mampostería como una unidad (*composite*) y no como dos elementos independientes (roca y mortero).

Las ondas sísmicas son “perturbaciones” que viajan a través del medio (las rocas), las cuales transportan energía desde un punto a otro sin transporte de materia (Rosales, 2001). Supone además, cambios de volumen (ondas P) y rotaciones (ondas S). El primer tipo se conoce como onda dilatacional, longitudinal, irrotacional, compresional y onda P (este último nombre se debe al hecho de que usualmente este tipo es el primer evento en el registro de un terremoto). El segundo tipo se denomina onda cortante, transversal, rotacional y onda S (puesto que usualmente es el segundo evento observado en registros de terremotos). La velocidad de la propagación de las ondas depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas, el módulo de Poisson y su módulo de rigidez entre otras propiedades (Sheriff & Geldart, 1991).

Metodología

Se describe a continuación la metodología seguida para la caracterización *in situ* de las propiedades mecánicas de la mampostería de un edificio patrimonial.

Identificación de los sistemas constructivos y tipos de mampostería

La identificación de los sistemas constructivos permitió determinar cuántos tipos de mampostería se deben caracterizar. Para poder realizar esta catalogación es necesario determinar el tipo de piedra, el sistema constructivo que se utilizó, el tipo de mortero, el banco de material del que se extrajeron las piedras, las etapas de construcción que tuvo el edificio, entre otros aspectos. Toda esta información permite localizar cada uno de los tipos de mampostería en el contexto del edificio e incluirlos, una vez caracterizados a un modelo numérico de análisis estructural del edificio.

Trabajo de campo (levantamiento)

Una vez identificados los elementos a caracterizar, se colocaron los geófonos sobre la superficie de los mismos formando una línea. Los geófonos deben estar colocados a determinadas distancias, que dependen de las características del elemento que se esté determinando (homogeneidad,

irregularidad de los materiales, etc), pudiendo éstos estar entre 0.40 y 1 metro de separación.

La línea de geófonos se conecta al equipo central (Figura 1). Para este estudio se usó un sismómetro GEODE de Geometrics de 24 canales y geófonos de 14 Hz de sensor horizontal. La onda sísmica o perturbación elástica se generó golpeando con un marro de 3 lb sobre la mampostería a caracterizar, a una distancia igual a la separación entre geófonos a ambos extremos de la línea de geófonos...

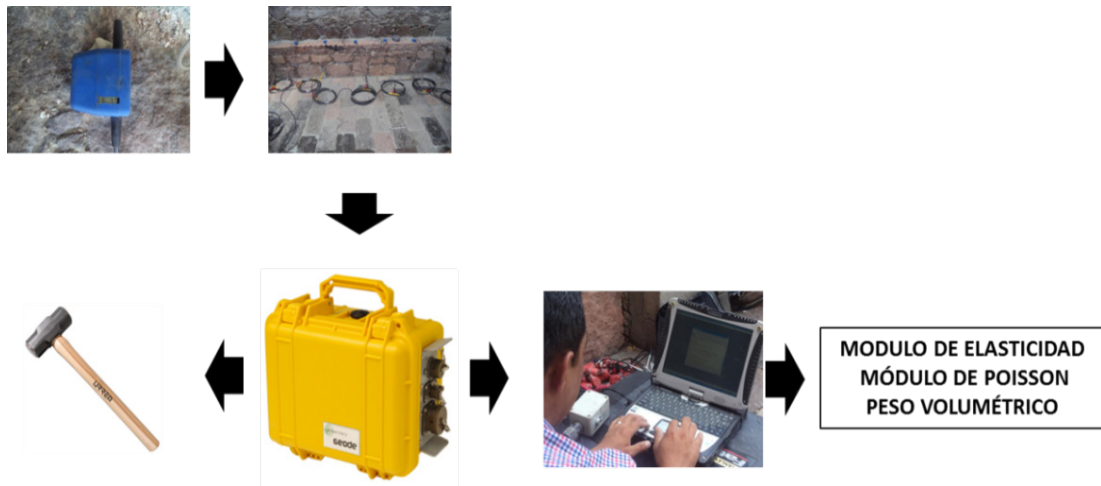


Figura 1. Conexión del equipo para levantamiento de onda. Fuente: Elaboración propia.

Identificación de Ondas (P y S)

Los registros se levantaron usando una ventana de tiempo que permitiera observar el arribo de ondas P y S a cada una de los geófonos de la línea.

La identificación de estos arribos, es probablemente, el paso más importante del proceso, ya que a partir de ellas se harán los cálculos para determinar las propiedades que se están buscando.

En registros de fuentes sísmicas lejanas es relativamente claro la identificación del arribo de las ondas P y ondas S por el claro retraso de las segundas (Figura 2). En el estudio realizado la identificación del arribo de las ondas S se realizó mediante la observación de un incremento en la amplitud de la onda.

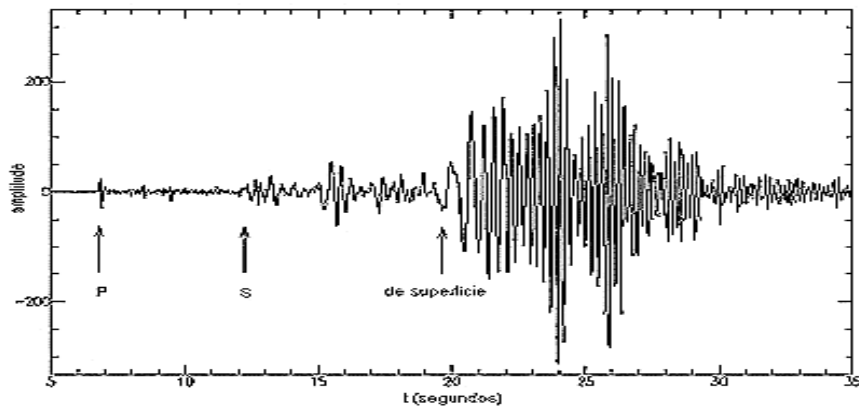


Figura 2. Vista de un registro de onda sísmica. Fuente: IGEO., 2013

Análisis de la información

Para realizar el análisis de la información, lo primero a realizar es convertir los datos obtenidos en campo, de formato SEG a formato ASCII por medio del programa TAPE. Este programa permite visualizar gráficamente los arribos de las ondas de cada uno de los geófonos que se tengan conectados (Esparza, 2013), donde los arribos de onda están dados en milisegundos. Así mismo, permite ver algunos datos con los que fue guardado el archivo durante el levantamiento en campo. A continuación se muestra en la Figura 3, una ventana sobre cómo se observa la pantalla desde TAPE:

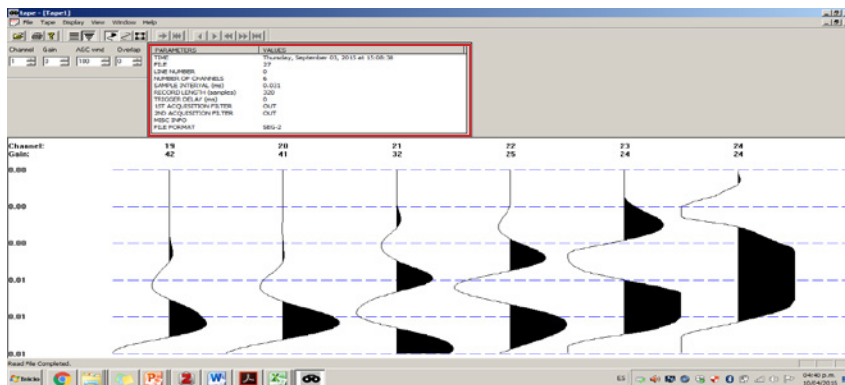


Figura 3. Vista de la pantalla del registro de un sistema constructivo y cómo se observan gráficamente las ondas. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado esto, se exportan estos datos a Excel, donde a partir del “sample interval” que se haya dado durante los levantamientos

se obtienen los tiempos de arribo de onda. Para obtener la velocidad de onda (Ecuación 1), se divide la distancia a la que se ubica el geófono del tiro de golpe, entre el tiempo de arribo, que fue calculado previamente.

$$V = \frac{\text{Distancia}}{\text{tiempo de arribo de onda}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Esto se hace con los registros que se obtengan de cada uno de los geófonos, y de cada sistema constructivo que se quiera caracterizar, no olvidando identificar la onda P y la onda S en cada uno de ellos. En la Tabla 1 se muestran los datos a determinar en esta etapa del procesamiento.

REGISTRO	ARRIBO P	ARRIBO S	DISTANCIA	VP	VS	VS/VP

Tabla 1. Determinación de la velocidad de onda. Fuente: Elaboración propia.

Para obtener las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, peso volumétrico y relación de Poisson), una vez obtenidas las velocidades de onda P (V_p) y velocidad de onda S (V_s), se utilizarán las fórmulas de la teoría de la elasticidad que relaciona las velocidades V_p y V_s con las constantes de Lamé (Sheriff y Geldart, 1991), como se muestra en las ecuaciones 2 y 3:

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

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde ρ es la densidad, que se puede calcular con la Ecuación 4, la cual está en gr/cm² y la V_p en m/s:

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

Una vez obtenidas las constantes de Lamé podrán utilizarse las fórmulas de la elasticidad que relacionan al módulo de elasticidad (Ecuación 5) y la relación de Poisson (Ecuación 6) con las constantes de Lamé (Sheriff y Geldart, 1991).

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{(\lambda+\mu)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$v = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Los resultados pueden integrarse a una tabla para su organización como la mostrada en la tabla 2.

ρ (gr/cm ²)	ρ (Kg/m ³)	μ	λ	E (Pa)	E (kg/cm ²)	v

Tabla 2. Determinación de la velocidad de onda. Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio

El Templo de San Antonio de Padua está localizado en el centro de la ciudad de Aguascalientes, de estilo ecléctico, es decir, que posee diversos estilos arquitectónicos como neorrenacentista, neobarroco, neogótico, neoclásico, árabe, ruso entre otros (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2010).

Identificación de los sistemas constructivos

El templo de San Antonio posee varios sistemas constructivos; sin embargo, en el estudio que Navarro (2013) realizó, identificó 5 sistemas constructivos correspondientes a la cimentación, muros de desplante (guardapolvo), muros del cuerpo principal, muros de la Capilla de Santa Rita y la fachada principal (Figura 4). Posteriormente durante la realización de este estudio se identificó un sistema constructivo más, correspondiente a las bóvedas del templo. A continuación se hace un resumen de cada uno de estos sistemas constructivos.



Figura 4. Identificación de los sistemas constructivos del Templo de San Antonio. Fuente: Elaboración propia.

Sistema constructivo 1.- Corresponde a la fachada principal, torres y cúpula del templo. Compuesta de cantera de dos colores, la primera de ceniza volcánica litificada de grano fino color verde-amarillo con

pseudo-estratificaciones y porosa; la segunda de color rosa-beige sin pseudo-estratificaciones y con grano fino. Ambas pegadas a hueso (Navarro, 2013).

Sistema Constructivo 2.- Corresponde a la cimentación, construida de “mampostería a base de bloques prismáticos de toba, posiblemente ignimbrita, bien litificada, con grano de fino a mediano, color naranja-salmón con juntas rajueadas del mismo material, no porosa y no absorbe agua” (Navarro, 2013: 31) . Las características del mortero con el que están unidos se desconocen.

Sistema Constructivo 3.- Correspondiente al muro del guardapolvo o muro de desplante, de mampostería de fragmentos de roca de formas ligeramente redondeadas de diferentes tamaños, colocadas de forma aleatoria y con juntas rajueadas con el mismo material. Es porosa y absorbe el agua (Navarro, 2013). Las características del mortero con el que están unidos se desconocen.

Sistema Constructivo 4.- Correspondiente a los muros de carga laterales, hechos a base de sillar de una toba de maticán (un limo arcilloso pobremente litificado), color beige claro, de grano grueso; con forma de bloques cuadrados de un tamaño promedio de 35 x 35 cm, rajueado con fragmentos de toba gris y verde. Unidos con mortero de arena y cal apagada (Navarro, 2013).

Sistema Constructivo 5.- Corresponde a los muros de carga del Camarín de Santa Rita; los cuales son bloques de una arenisca arcillosa muy porosa, con material orgánico (posiblemente sedimentario). Los bloques están burdamente cuadrados, rajueados horizontalmente con fragmentos de toba gris (Navarro, 2013).

Sistema Constructivo 6.- Corresponde al sistema de cubiertas a base de bóvedas de crucería de vigueta y bóveda de ladrillo (Navarro, 2013), de los cuales se desconoce su procedencia.

Trabajo en campo

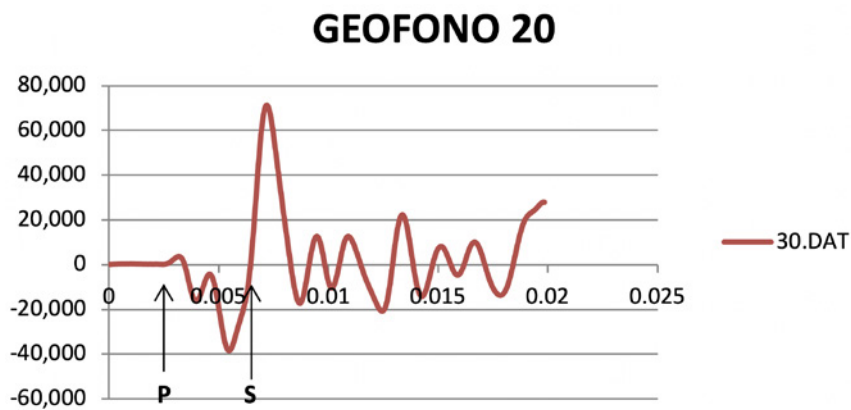
Una vez identificados los sistemas constructivos a caracterizar, en campo se acomodaron los geófonos sobre la superficie de los elementos, tal y como se muestra en la Figura 5. Se realizó el procedimiento que se mencionó anteriormente, generando los impulsos dinámicos a partir de un golpe de un marro de 3 lb.



Figura 5. Determinación de las propiedades del templo de San Antonio. Fuente: Propias.

Identificación de Ondas (P y S)

En la Gráfica 1 se muestra el registro de onda del geófono 20, de uno de los levantamientos que se realizaron en el sistema constructivo 2, correspondiente a la cimentación del templo. Se observa la identificación de ondas P y S.



Gráfica 1. Levantamiento del geófono 20 en el sistema constructivo 2 (cimentación). Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la información

Los datos se exportaron a Excel, donde el procesamiento de esta información se observa de la siguiente manera:

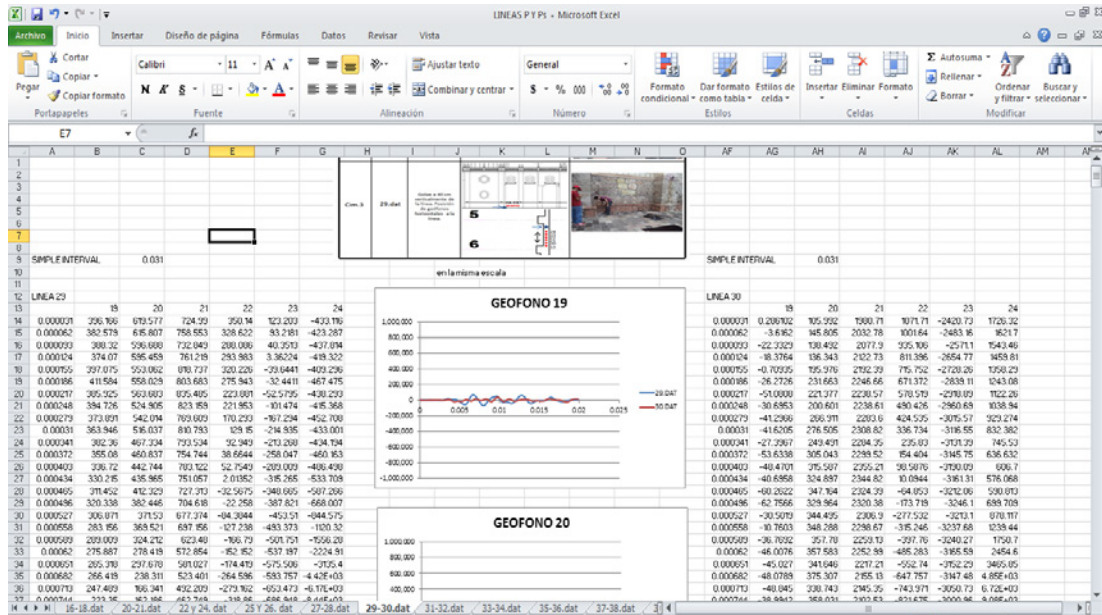


Figura 6. Vista de la pantalla del análisis de ondas en Excel. Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las velocidades de onda (onda P y S) de cada uno de los geófonos que se colocaron sobre los diferentes sistemas constructivos; y se calcularon las constantes elásticas de la mampostería de los seis sistemas constructivos previamente identificados. En la Tabla 3 se presentan los promedios de todas las determinaciones realizadas en cada uno de los sistemas constructivos. En la tabla Vp: velocidad de onda P, Vs: la velocidad de onda S, g: el peso volumétrico, E: módulo de elasticidad, y n: la relación de Poisson; en las últimas tres columnas están los mismos resultados, redondeados.

PARTE	Vp	Vs	γ	E	ν	γ	E
Sistema Constructivo 1 Fachada, Torres, Cúpula	1350.96	550.42	1,876	13,847.37	0.41	1,880	13,850
Sistema Constructivo 2 Cimentación	1790.88	760.10	1986	32,612.55	0.37	1,990	32,620
Sistema Constructivo 3 Guardapolvo	1510.74	737.00	1,928	26,948.86	0.34	1,930	26,950
Sistema Constructivo 4 Muros de la nave	905.40	584.29	1,699	11,233.13	0.25	1,700	11,240
Sistema Constructivo 5 Muros del Camarín	863.46	500.27	1,679	6,507.91	0.36	1,680	6,510
Sistema Constructivo 6 Bóvedas	2675.39	710.90	2213	31106.51	0.45	2,220	31,110

Tabla 3. Promedio de valores de la caracterización. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El método propuesto permite determinar algunas propiedades mecánicas de los materiales que son necesarias en el análisis estructural a partir de modelos numéricos. Las propiedades que pueden ser obtenidas son el módulo de elasticidad, peso volumétrico y la relación de Poisson, que permiten utilizarse en un análisis lineal-elástico.

Es importante mencionar que entre más información se recabe en campo (levantamientos de diferentes partes de los sistemas constructivos y que abarquen superficies grandes) más confiable será la información que se obtenga. Se recomienda realizar los levantamientos durante horarios en donde no exista ruido ambiental que altere las mediciones, tales como tráfico vehicular, peatones o maquinaria trabajando.

Referencias

- Animas, H., Navarro, M., Pacheco, J., García, J.L., et al. (2013). *3er Foro Internacional en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos y Jornadas Internacionales de Investigación*. 26 de junio 2013 Aguascalientes, México, UAA / Universidad de Alcalá.
- Animas, H. y Pacheco, J. (2015). *Convergencias del diseño y de la construcción IV. Arquitectura, ingeniería civil y urbanismo. Sociedad, patrimonio urbano y sustentabilidad*. In: [En línea]. 2015 Aguascalientes, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes. pp. 356–369. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/279460638_DINAMICA_MULTIDISCIPLINARIA_DE_LOS_FACTORES_QUE_INFLUYEN_EN_LA_PRESERVACION_DE_LOS_EDIFICIOS_PATRIMONIALES?ev=prf_pub [Consultado: 3 de junio 2016].
- Animas, H., Pacheco, J. y Ortiz, J.Á. (2014). Cultural HELP 2014. Cultural Heritage and Loss Prevention. En: *Cultural HELP 2014. Cultural Heritage and Loss Prevention*. [En línea]. Octubre 2014 Porto, Portugal. Obtenido de: http://www.academia.edu/10347041/Evaluation_of_the_Structural_Health_of_Heritage_Buildings_by_the_Use_of_Vibration-Based_Damage_Detection_Methods [Consultado: 1 de febrero 2015].
- ASNT (2015) *The American Society for nondestructive testing*. [En línea]. 2015. Obtenido de: <https://www.asnt.org/> [Consultado: 23 de marzo 2016].
- Esparza, C.J. (2013). *Diagnóstico y propuesta de rescate estructural de la capilla de La Trinidad, San Francisco de los Romo, Ags*. Tesis de Maestría. Aguascalientes, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

- Esquivel, H. (2010). *Mampostería*. [En línea]. Obtenido de: http://www.ingenieria.unam.mx/herescas/pce_1427/Apuntes_Mamposteria.PDF [Consultado: 3 de junio 2016].
- Gere, J. y Goodno, B. (2010). *Mecánica de materiales*. Séptima. México, CENGAGE Learning.
- Gobierno del Estado de Aguascalientes (2010). *Templo de San Antonio*. [En línea]. 2010. ¡Viva Aguascalientes! Obtenido de: http://www.vivaaguascalientes.com/UI/frm_Datos.aspx?IA=373 [Consultado: 9 de febrero 2015].
- IGEO. (2013). *El núcleo líquido de la Tierra*. [En línea]. 14 de marzo 2013. Instituto de Geociencias. Obtenido de: <http://www.igeo.ucm-csic.es/cultura-cientifica/divulgacion/228-igeoquiz-12-marzo-el-n%C3%BAcleo-l%C3%ADquido-de-la-tierra> [Consultado: 4 de mayo 2016].
- Navarro, M. (2013). *Levantamiento geométrico y de daños del templo de San Antonio y análisis estructural de la situación actual*. Tesis de Maestría. Aguascalientes, México, Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Rosales, C. (2001). *Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia*. Tesis de licenciatura. [En línea]. Santiago de Cali, Colombia, Universidad del Valle. Obtenido de: <http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/comportamiento.html> [Consultado: 23 de marzo 2016].
- Sheriff, R.E. y Geldart, L.P. (1991). *Exploración sísmológica. Volumen I.- Historia, teoría y obtención de datos*. Primera. México, LIMUSA, S.A. de C.V.

