

Edificios históricos de mampostería y herramientas para su estudio estructural

♦ Natalia García Gómez

La conservación del patrimonio arquitectónico es una tarea compleja que necesita la participación multidisciplinaria para alcanzar buenos resultados. Se requiere analizar las edificaciones históricas en la integridad de todos sus componentes, puesto que el valor de cada edificio no se basa solo en la apariencia de sus elementos, sino que ellos representan una manera de construir específica de una época y lugar determinados;¹ de hecho, algunos monumentos históricos constituyen en sí mismos un logro desde el punto de vista estructural.² Su permanencia es una prueba de los conocimientos que los antiguos constructores tenían acerca de los materiales y sistemas de construcción de su tiempo.

Gracias a las enseñanzas obtenidas con los errores estructurales o constructivos cometidos y los daños causados por accidentes, como los sismos, seguramente ellos fueron perfeccionando sus edificaciones hasta lograr estructuras cada vez más efi-

cientes.³ Sin embargo, con el paso del tiempo estas suelen tener deterioros o cambios relevantes que disminuyen su seguridad estructural, lo que hace necesario restablecer su integridad y estabilidad original. En estos casos se debe procurar que los trabajos de intervención afecten lo menos posible su originalidad.

Para preservar la seguridad en edificaciones históricas es indispensable conocer con profundidad aspectos como el origen de su solución estructural, el comportamiento de su estructura bajo distintas condiciones de carga y su respuesta después de sufrir cambios en su configuración arquitectónica o constructiva. Para ello, se requiere la participación de disciplinas como la historia, arqueología, restauración, arquitectura e ingeniería, entre otras,⁴ la cual es particularmente necesaria cuando algún edificio presenta problemas de inestabilidad. En estos casos, la ingeniería de estructuras tiene un papel muy importante, aunque frecuentemente



¹ *Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, ISCARSAH, Icomos, 2001, p. 4.

² Pere Roca, "The study and restoration of historical structures: from principles to practice", en Paulo B. Lourenço, Pere Roca, Claudio Modena y Shailesh Agrawal (eds.), *Structural Analysis of Historical Construction. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques*, vol. 1, Proceeding of the 5th International Conference, Nueva Delhi, 6-8 de noviembre de 2006, University of Minho, Guimarães, 2006, p. 10.

³ Panos Toulitatos, "Prevención de desastres sísmicos en la historia de las estructuras en Grecia", trad. Elizabeth Mansilla e Ignacio Rubio, en Elizabeth Mansilla (ed.), *Desastres: modelo para armar. Colección de piezas de un rompecabezas social*, La Red, México DF, 1996, pp. 197-215, <http://bit.ly/PEYZqs>, consultado en febrero de 2012.

⁴ Paulo B. Lourenço, "Analysis of historical constructions: from thrust-lines to advanced simulations", en Paulo B. Lourenço y Pere Roca (ed.), *Historical Constructions, 3er Intern. Symp. Guimarães*, 7-9 November 2001, University of Minho, pp. 91-116.

♦ Profesora e investigadora, Facultad de Arquitectura, UAEM



se le trata más bien de manera cualitativa,⁵ con poco o nulo uso de las técnicas modernas de análisis desarrolladas en ese campo. Al respecto, ha prevalecido la idea, entre algunos especialistas en restauración, de que los monumentos históricos no requieren análisis estructurales sofisticados y que las decisiones deben basarse en consideraciones cualitativas para no afectar la capacidad original de las construcciones.⁶ Pero como ya se ha dicho, la capacidad original puede verse afectada con el paso del tiempo y a veces es necesario intervenir en ella para evitar su pérdida total.

Los errores que en ocasiones han ocurrido al aplicar los principios de análisis estructural en problemas de seguridad en monumentos históricos se deben principalmente a su uso directo, sin tomar en cuenta la naturaleza de dichos monumentos, distinta de la de los edificios modernos, por lo cual se han obtenido resultados negativos en algunos casos.⁷ Estos errores han creado dudas en especialistas en restauración sobre la validez

de la aplicación de aquellas formas de análisis en edificios históricos. Sin embargo, si se tiene una base adecuada, es posible conocer la estabilidad y el comportamiento de estas edificaciones aprovechando los principios y las herramientas de análisis actuales, válidos para cualquier tipo de construcción,⁸ y considerando además, por supuesto, estudios de tipo cualitativo.

En las últimas décadas del siglo pasado se desarrollaron muchas herramientas de análisis y estudio para comprender mejor el comportamiento de la estructura de edificaciones históricas de mampostería. En México, autores como Meli,⁹ Peña,¹⁰ Orduña¹¹ y Roeder,¹² así como, Lemos,¹³ Lourenço¹⁴ y D'Ayala¹⁵ en el extranjero, entre otros, han hecho estudios experimentales, de simulación numérica y propuestas de refuerzo para edificaciones antiguas de mampostería. Trabajos como estos son una muestra de la aplicación de los principios de la ingeniería estructural, así como de sus alcances y posibilidades de desarrollo futuro.

⁵ Roberto Meli, *Ingeniería estructural de los edificios históricos*, Fundación ICA, México D F, 1998, p. 4.

⁶ Roberto Meli y Roberto Sánchez, "Considerations on the seismic safety of historical monuments", *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2087, Elsevier Science Ltd., 1996.

⁷ Roberto Meli, *Ingeniería estructural...*, *op. cit.*, p. 4.

⁸ *Ibid.*, p. 3.

⁹ Roberto Meli y Roberto Sánchez, "Criteria and experiences on structural rehabilitation of stone masonry buildings in Mexico City", *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 1, núm. 1, enero de 2007, pp. 3-28.

¹⁰ Fernando Peña, *Rigid Element Model for Dynamic Analysis of in Plane Masonry Structures*, PhD Thesis Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Milano, 2001.

¹¹ Agustín Orduña, *Seismic Assessment of Ancient Masonry Structures by Rigid Blocks Limit Analysis*, PhD Thesis, University of Minho, Guimarães, 2003, en Masonry and Historical Construction Group, University of Minho, <http://bit.ly/P4fEaz>, consultado en febrero de 2012.

¹² Guillermo Roeder, *Simulación numérica del comportamiento mecánico de la mampostería*, tesis de doctorado, UNAM-Instituto de Ingeniería, México DF, 2004.

¹³ J. V. Lemos, "Modeling stone masonry dynamics with 3DEC", *Numerical Modeling of Discrete Materials*, Taylor & Francis Group, Londres, 2004, pp. 7-13.

¹⁴ Paulo B. Lourenço, "Analysis of historical...", *op. cit.*, pp. 91-116.

¹⁵ Dina D'Ayala, "Numerical modelling of masonry structures", en M. Forsyth (ed.), *Structures & Construction in Historic Building Conservation*, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 2007.

Normatividad

Los trabajos para conservar el patrimonio arquitectónico se han realizado históricamente desde diversos puntos de vista, en particular los concernientes a la restauración estructural.¹⁶ Antes de la aparición de la *Carta de Atenas*,¹⁷ se realizaban trabajos de rehabilitación estructural sin problema, siempre y cuando no se afectaran las características artísticas de la edificación. Pero con la aparición del concreto reforzado y el acero, los expertos observaron que el uso de estos materiales podía resultar en un comportamiento estructural diferente del original y más cercano al de las construcciones actuales.¹⁸

Por lo que en los lineamientos de la *Carta de Venecia*, la estructura de los monumentos se tomó en cuenta como un valor intrínseco de los edificios.¹⁹ Es decir, se le dio la importancia debida a la salvaguarda de la condición original de la estructura cuando se hacen trabajos de restauración. Esto nos indica la importancia de estudiar cómo fueron concebidos originalmente estos edificios desde el punto de vista estructural, para poder armonizar el punto de vista de los especialistas en restauración, que buscan preservar estas características intrínsecas, con las necesidades que observan los especialistas encargados de evaluar su estabilidad e integridad estructural.

Actualmente, gracias al avance en las técnicas de construcción y a la aparición de nuevos materiales, contamos con una amplia gama de posibilidades para preservar y conservar el patrimonio arquitectónico. Los trabajos de restauración deben basarse en los principios modernos para intervenir en las edificaciones históricas, y deben tener en cuenta la reversibilidad, durabilidad y compatibilidad de los materiales usados, así como la seguridad de la estructura, entre otros aspectos.

Dados estos requerimientos, y la imposibilidad de emplear los reglamentos para construcciones modernas, a partir de 2003, el International Council on Monuments and Sites (Icomos) adoptó las *Recomendaciones para el Análisis y la Restauración de Estructuras Históricas* (ISCARSAH, por sus siglas en inglés). En este documento se establecen lineamientos y una metodología que no pretende reemplazar los textos científicos y culturales existentes en cada región,²⁰ sino que más bien es un complemento de enorme valía e indispensable de atender.

Dificultades en el análisis de edificios históricos de mampostería

Dos de las características más importantes de los edificios antiguos con respecto a los que se construyen actualmente son su geometría compleja y las cualidades mecánicas de la mampostería, cu-

¹⁶ Pere Roca, "The study and restoration...", *op. cit.*, p. 9.

¹⁷ Carta para la Restauración de Monumentos Históricos (Carta de Atenas), Primer Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Atenas, 1931.

¹⁸ Pere Roca, "The study and restoration ...", *op. cit.*, p. 9.

¹⁹ Carta Internacional para la Conservación y la Restauración de Sitios y Monumentos Históricos (Carta de Venecia), Segundo Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia, 1964, p. 10.

²⁰ *Recommendations for the Analysis...*, *op. cit.*, p. 3.



yas propiedades distan mucho de las de materiales modernos como el acero o el concreto reforzado. Su dificultad geométrica obliga a construir modelos más elaborados, es decir, frecuentemente no es posible hacer su análisis mediante esquemas estáticos simplificados bidimensionales.²¹ Por otra parte, la naturaleza de la mampostería, material altamente heterogéneo que puede estar compuesto por una gran variedad de materiales (piedras y morteros de diversos tipos, según cada región) y tener diversos arreglos entre sus elementos componentes, es decir, diferentes tipos de aparejos, hace que su comportamiento sea difícil de modelar y que la predicción de su respuesta sea más complicada que en estructuras modernas, en las que sus componentes tienen propiedades mecánicas más definidas y su geometría suele ser más regular. Aunado a esto, los largos periodos de construcción y la diferencia en la mano de obra incrementan la heterogeneidad de la mampostería,²² y los pocos o nulos datos acerca de la composición interna de los elementos estructurales aumentan la complejidad de su análisis.

Herramientas de análisis modernas

En el marco del modelado numérico de la mampostería existen principalmente dos aproximaciones: *micromodelos* y *macromodelos*.²³ Los primeros definen como elementos continuos las piezas y las juntas de mortero, y como elementos de interfaz la frontera entre ellos; los segundos idealizan a la mampostería como un solo material con sus propiedades homogeneizadas.²⁴ La elección del modelo a emplear depende de los objetivos del análisis y de los datos disponibles del material y la estructura. Algo semejante ocurre cuando se trata de identificar el método más apropiado para analizar una estructura antigua de mampostería: pueden emplearse los métodos de análisis elástico lineal, no lineal y análisis límite; cada uno de ellos tiene distintos niveles de aproximación, complejidad, costo y requerimientos.²⁵ En particular, el método de elementos finitos es una herramienta que actualmente se aplica en diversos campos del conocimiento y que es de gran ayuda para elaborar modelos de edificios con geometría compleja, a los cuales se necesita aplicar análisis de tipo elástico lineal o no lineal.

²¹ Aldo Giordano, Elena Mele y Antonello de Luca, "Modelling of historical masonry structures comparison of different approaches through a case study", *Engineering structures*, vol. 24, núm. 8, 2002, pp. 1057-1069.

²² Roberto Meli y Roberto Sánchez, "Considerations on the...", *op. cit.*

²³ Giuseppe Creazza, Renato Matteazzi, Anna Saetta, Renato Vitalini, "Analyses of masonry vaults: a macro approach based on three-dimensional damage model", *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, núm. 5, 2002, pp. 646-654.

²⁴ Jaime López, Sergio Oller y Eugenio Oñate, *Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1998, p. 3.

²⁵ Paulo B. Lourenço, "Analysis of historical...", *op. cit.*, p. 92.

La elección de uno de los métodos de análisis mencionados depende de la información disponible, del tipo de mampostería, del costo y de la disponibilidad de personal capacitado.²⁶ De estos métodos, el más completo es el análisis no lineal, ya que puede predecir el comportamiento del material, desde el rango elástico hasta el colapso de la estructura; sin embargo, no siempre es conveniente usarlo, pues es necesario conocer un mayor número de parámetros del material que los requeridos para el análisis límite. En este método la complejidad se incrementa particularmente cuando se usan modelos del material más refinados o *micromodelos*. Lourenço recomienda, para la elección del método de análisis, preferir la simplicidad a la complejidad, no usar elementos tridimensionales a menos que sea necesario, y evitar análisis de tipo elástico lineal;²⁷ no obstante, este último método es de mucha utilidad para análisis preliminares y para conocer el comportamiento global de la estructura.

Métodos usados por los antiguos constructores

En el pasado, las edificaciones de mampostería fueron construidas con base en el método de prueba y error, y en métodos transmitidos de una genera-

ción a otra, que frecuentemente eran guardados celosamente por quienes ejercían el oficio. Aunque autores como Straub,²⁸ Sanabria²⁹ y Huerta³⁰ han estudiado los métodos para diseñar elementos estructurales de edificaciones antiguas a través de los antiguos tratados de construcción, poco sabemos acerca de las bases estructurales de esos métodos y su aplicación real en la construcción. Cuando es necesario justificar una intervención en la estructura de un edificio histórico, estos conocimientos pueden ser de gran utilidad, ya que ayudarían a conocer las bases de su concepción estructural, y nos aproximaríamos más a su comportamiento real para contribuir en la preservación de su seguridad con poca afectación de sus valores y originalidad.

Reglas parecidas a la mostrada en la figura 1, con la que se obtiene el contrafuerte necesario para contrarrestar el empuje de un arco o bóveda de mampostería, han sido analizadas por la autora de este artículo con el objetivo de identificar su posible uso en edificaciones religiosas construidas en el siglo XVI,³¹ junto con otras para conocer el procedimiento que emplearon los antiguos constructores para trazar las bóvedas de nervaduras mexicanas.

Es posible, por ejemplo, conocer el método para el trazo de los terceletes y para determinar

²⁶ Paulo B. Lourenço, "Guidelines for the analysis of historical masonry structures", en M. A. N. Hendriks *et al.*, *Finite Elements in Engineering and Science*, A. A. Balkema, Rotterdam, 2002, pp. 241-247, en Masonry and Historical Construction Group, University of Minho, <http://bit.ly/MOYBYM>, consultado en febrero de 2012.

²⁷ Paulo B. Lourenço, "Analysis of historical...", *op. cit.*, p. 114.

²⁸ Hans Straub, *A History of Civil Engineering: An Outline from Ancient to Modern Times*, The MIT Press, Cambridge, 1964.

²⁹ Sergio Luis Sanabria, "The mechanization of design in the 16th century: structural formulae of R. Gil de Hontañón", *Journal Society of Architectural Historians*, vol. 41, núm. 4, 1982.

³⁰ Santiago Huerta, *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas de España*, tesis doctoral, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1990.

³¹ Natalia García y Roberto Meli, "On structural bases for building the mexican convent churches from the 16th century", *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 4, núm. 1, Taylor & Francis, 2009, pp. 54-51.

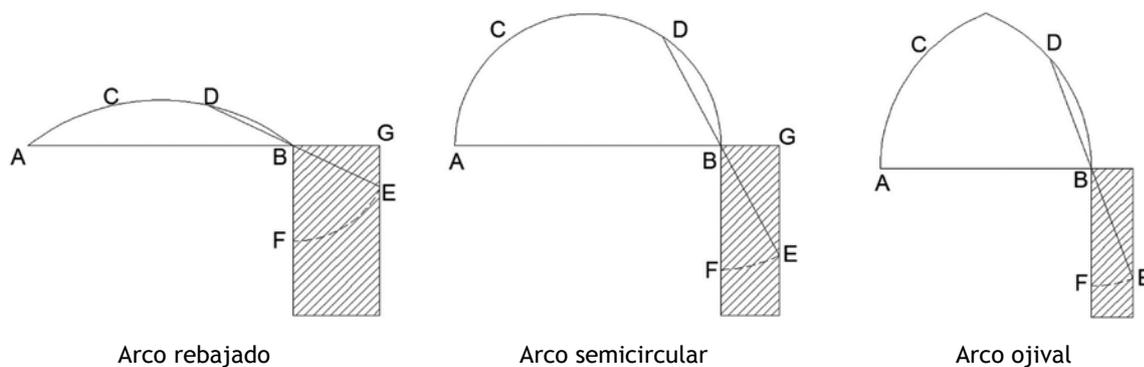


Figura 1. Regla de Martínez de Aranda, Blondel y el padre Denard³²

la profundidad de los contrafuertes necesarios para bóvedas de nervaduras. Esto se ha hecho en la planta de una de las crujías de la bóveda del templo del ex convento dominico de Oaxtepec, Morelos, construido en el siglo XVI. Dada la complejidad de su geometría, se usó un escáner láser para el levantamiento arquitectónico y en la realización de un modelo de elementos finitos de una crujía de la bóveda para su análisis, junto con el de otros templos de la época, en el estudio de su eficiencia estructural.

Estudios de este tipo nos ayudan a recuperar el conocimiento perdido de las antiguas prácticas de construcción y a recopilar la experiencia de los maestros constructores³³ de otras épocas. Esto nos pone en contexto para realizar análisis de tipo es-

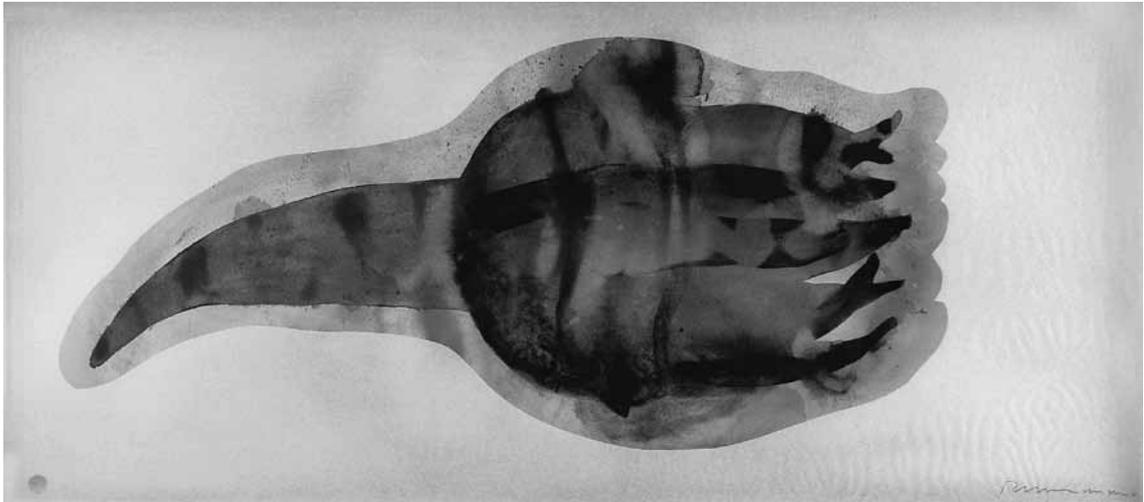
tructural mediante cualquiera de los métodos que se describieron en el apartado anterior.

La importancia de comprender el comportamiento estructural de las edificaciones que conforman el patrimonio arquitectónico y el hecho de que en nuestro país este tema comúnmente es tratado por pocos especialistas, hacen de este un campo de estudio muy amplio que es necesario abordar para crear conocimientos que ayuden a preservar la seguridad estructural de estas edificaciones.

Aunque en ocasiones los requerimientos de restauración y los de seguridad puedan sostener puntos de vista contrapuestos, es posible, mediante investigaciones multidisciplinarias, salvar las diferencias y acordar la mejor manera de abordar un trabajo de conservación y restauración.

³² François Derand, *L'architecture des voutes*, Sébastien Cramoisy, París, 1643.

³³ Santiago Huerta, *Diseño estructural de arcos...*, *op. cit.*, p. 359.



Terra viridis 24. Pigmento sobre papel, 45 x 90 x 5 cm, 2010