

Estrategias para modelar y analizar edificios históricos de mampostería

El propósito de este artículo es esbozar diferentes estrategias y técnicas de análisis estructural utilizadas en el análisis de edificios históricos que constituyen el patrimonio arquitectónico del país.

Al intervenir un edificio histórico es importante tener una comprensión total del comportamiento estructural del inmueble, así como de las características de sus materiales, con el fin de salvaguardar sus valores intrínsecos e históricos. De este modo, el diagnóstico y evaluación de su seguridad se basan tanto en información histórica, como en procedimientos cualitativos y cuantitativos.

El comportamiento estructural de un edificio antiguo de mampostería difiere sustancialmente del de una estructura moderna por el tipo de estructuración y los materiales usados. Las teorías y técnicas de análisis existentes permiten modelar numéricamente el comportamiento de estructuras complejas con gran precisión, pero los edificios históricos de mampostería necesitan procedimientos específicos, porque se trata de un

material compuesto, lo que dificulta lograr modelos que reproduzcan adecuadamente su comportamiento.

La mampostería está compuesta por piezas en las que intervienen materiales y formas diversas. Sin embargo, los diferentes tipos de mampostería comparten algunas características en su comportamiento mecánico: en primer lugar, una resistencia a tensión muy baja y con falla casi-frágil y, en segundo lugar, la carencia de comportamiento elástico-lineal, ya que aun ante esfuerzos pequeños se degrada.

La interacción entre bloques y mortero es muy compleja tanto por la diferencia de rigideces y resistencias de ambos materiales como por el tipo de aparejo de la mampostería. Esta interacción —conocida como comportamiento microestructural— es la causa del desempeño ortótropo de este material, es decir de que tenga diferentes características mecánicas (módulos de elasticidad y resistencias), según la dirección en que se le aplique una carga.

Es evidente que resulta impráctico, si no imposible, realizar la discretización de cada bloque y junta de mortero en el modelo analítico de una estructura real. Por tanto, es necesario considerar la estructura como un material homogéneo, y describir el comportamiento heterogéneo de la mampostería, tomando en cuenta las propiedades medias del material (las constantes elásticas y los parámetros de resistencia). Este proceso se conoce como homogenización, y se realiza mediante pruebas numéricas con un modelo computacional (generalmente de elementos finitos) o, directamente, mediante pruebas experimentales en laboratorio o *insitu*.

Además, la geometría de las construcciones históricas es bastante compleja, porque muchas veces no hay una clara diferencia entre los elementos estructurales y los arquitectónicos. En las estructuras modernas es muy fácil determinar el elemento que trasmite la fuerza; en cambio, en las antiguas a veces hay elementos que son decorativos que no aportan resistencia a los edificios, es decir la idealización depende fundamentalmente del tipo de elemento y su geometría, pero también hay que conocer las condiciones de frontera, apoyos, solicitaciones e idealización de otros elementos de la estructura. La forma más común de idealizar la geometría se basa en que la estructura está

formada por elementos que se pueden modelar como lineales (tipo barras), bidimensionales (tipo placa o cáscara) o elementos sólidos tridimensionales.

Respecto a los materiales, las idealizaciones más usadas para modelar su comportamiento consideran el funcionamiento elástico, plástico y no lineal. Los análisis inelásticos se deberían preferir a los elástico-lineales porque el comportamiento de la mampostería no se describe satisfactoriamente de forma elástica. El análisis no lineal es el método más eficaz para describir la respuesta completa de una estructura.

Hay métodos de análisis muy refinados como los de elementos finitos, discretos o discontinuos; o modelos simplificados como los de macroelementos, modelos de elemento rígidos o análisis límite. La utilización de cada método depende del problema y los recursos para resolverlo y cada uno de ellos tiene ventajas y limitaciones.

En general los métodos refinados permiten analizar estructuras complejas, describiendo correctamente los materiales. Pero los recursos computacionales necesarios son elevados, lo que hace difícil el modelado de estructuras completas o realizar análisis paramétricos. Por el contrario, los métodos simplificados son útiles para analizar grandes estructuras o realizar análisis paramétricos, pero tienen la limitante de sus hipótesis simplificadoras, que algunas veces pueden llegar a no cumplirse.

En la práctica, los métodos más utilizados para el análisis de construcciones históricas son: elementos finitos, elementos rígidos, elementos discretos y el análisis elástico lineal, ya que sus características permiten aplicarlos a un mayor número de construcciones de mampostería.

El método de los *elementos finitos* es ampliamente conocido entre los profesionistas dedicados al análisis de estructuras. Entre sus ventajas está la posibilidad de realizar modelos detallados y de geometría compleja, con diversas condiciones de carga. Sin embargo, exige grandes recursos computacionales, principalmente cuando se intenta simular el comportamiento no lineal. Este método permite incorporar un modelo constitutivo para simular los principales fenómenos asociados con la falla del material. La evolución del daño se

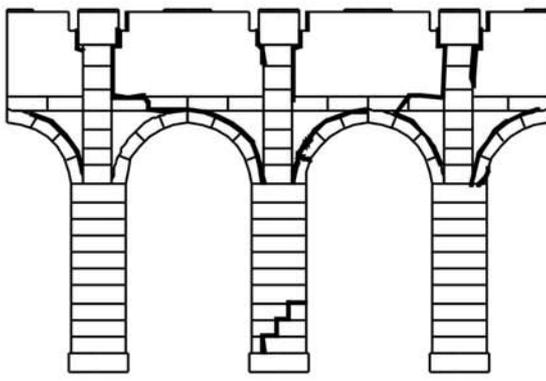
puede modelar asignando relaciones constitutivas adecuadas, que pueden deducirse a partir de las hipótesis que se emplean en teorías matemáticas tales como: la teoría de la plasticidad, modelos de daño del continuo, agrietamiento distribuido, etcétera.

El método de *elementos discretos* se utiliza en el estudio de medios discontinuos, y permite estudiar el movimiento relativo entre elementos. Un ejemplo de este tipo son las construcciones históricas formadas con bloques de piedra, como las columnas, esculturas, arcos y templos griegos o romanos. Este tipo de comportamiento también es típico de construcciones de mampostería simple, las cuales tienden a fallar formando macrobloques. Los modelos basados en sistemas de bloques rígidos proporcionan una herramienta adecuada para el estudio de su comportamiento dinámico bajo acciones sísmicas.

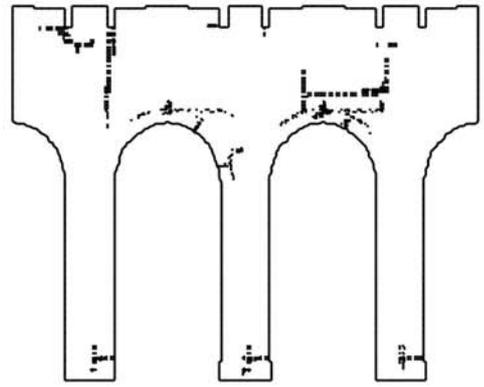
El método de los *elementos rígidos* se aplica en estructuras de mampostería que resisten fuerzas en su plano, como un ensamble de elementos rígidos que tienen una cinemática de cuerpos rígidos con dos desplazamientos lineales y una rotación. Los elementos rígidos se conectan entre sí mediante tres puntos de conexión (resortes inelásticos), dos axiales separados entre sí para tomar en cuenta los momentos, y uno de cortante. La mampostería es considerada como un material deformable, pero esta deformación se concentra en los puntos de conexión, mientras que el elemento en sí es indeformable (rígido). En otras palabras, los puntos de conexión representan las características mecánicas del material, pero al mismo tiempo representan la capacidad del modelo para tomar en cuenta la separación o deslizamiento entre elementos.

Un modelo de *elementos rígidos* puede ser considerado como un modelo semicontinuo, en el que los elementos son capaces de separarse o deslizarse entre ellos; hay un movimiento relativo entre dos elementos (separación o deslizamiento), pero las conectividades iniciales del modelo no cambian durante el análisis y existe una continuidad relativa.

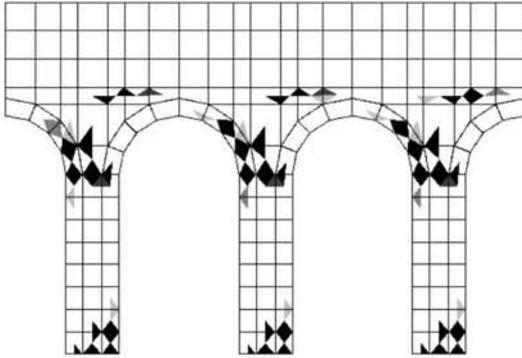
Para evaluar sísmicamente las construcciones históricas, a menudo es suficiente conocer únicamente la capacidad de carga y el mecanismo de colapso de la estructura. De este modo, el análisis límite es una he-



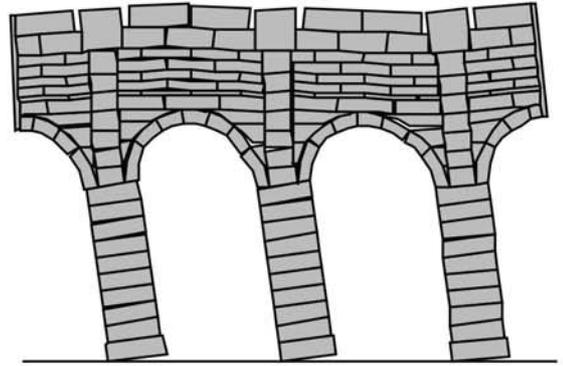
(a)



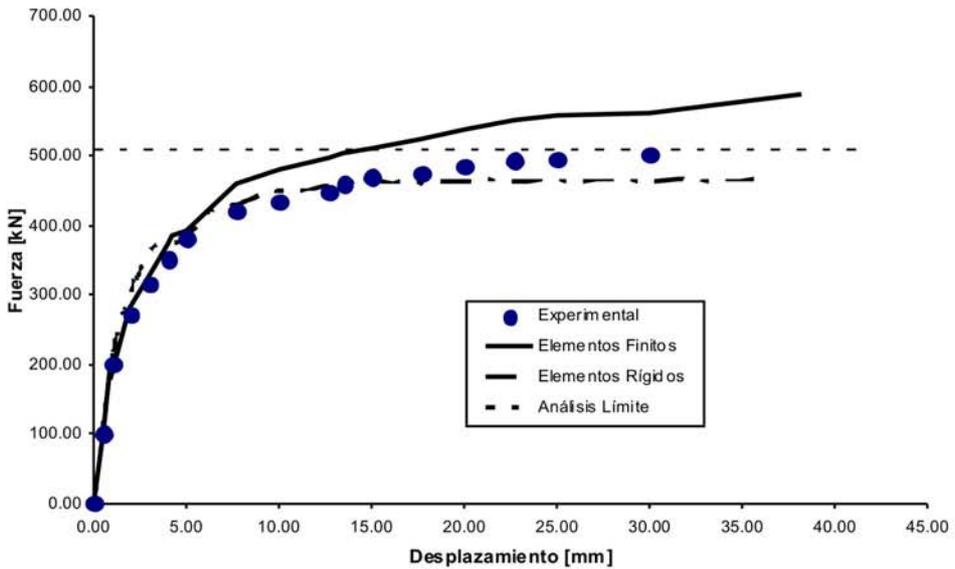
(b)



(c)



(d)



(e)

Ejemplo de una arcada estudiada experimentalmente (a) y modelada con tres métodos diferentes: elementos finitos no-lineales (b), elementos rígidos (c) y análisis límite (d). Los daños calculados con los tres diferentes métodos coinciden con el agrietamiento observado experimentalmente. Así mismo, los tres modelos predicen correctamente las curvas de capacidad (e) de la estructura. Cabe hacer notar que del análisis límite solo se puede conocer la carga última, por lo que es representada por una línea constante, en las curvas de capacidad.

herramienta muy útil, pues consiste en satisfacer las condiciones de equilibrio estático de la estructura, sin tomar en cuenta las ecuaciones de compatibilidad (deformabilidad). Es decir, este método requiere solamente la resistencia del material, por lo que no es necesario conocer otros parámetros, como la rigidez. Sin embargo, no estima las deformaciones de la estructura, así que los resultados se reducen a la carga última, mecanismo de colapso y esfuerzos en los puntos o secciones críticos.

En algunos casos, esta información es suficiente para evaluar edificios pequeños de estructuración simple o algunos elementos de estructuras más complejas, como arcos, contrafuertes o bóvedas. También es útil para diseñar el posible refuerzo en construcciones en que se han identificado los mecanismos de falla mediante otras herramientas de análisis que toman en cuenta la deformabilidad de la estructura.

Sin embargo, la complejidad de estos análisis y la falta de información confiable de los parámetros necesarios para definir el comportamiento postelástico de la mampostería limitan su aplicación práctica a menudo, especialmente en estructuras complejas. Una estrategia con algunas ventajas es utilizar la información obtenida mediante análisis elásticos como guía para construir modelos de partes críticas de la estructura que podrían ser estudiados por separado con modelos más refinados. De este modo, los análisis elástico–lineales pueden proporcionar información preliminar sobre el comportamiento estructural de construcciones de mampostería (modos de vibración, zonas débiles o críticas de la estructura, así como elementos con comportamiento indeseable) y su vulnerabilidad. Es necesario insistir en que ningún estudio sobre el comportamiento estructural de un edificio histórico de mampostería se debe basar única y exclusivamente en análisis elástico–lineales, por el riesgo de no obtener una correcta valoración.

Siempre y cuando sea validado, cualquier modelo analítico es valioso, independientemente del método y tipo de análisis, pues ayuda a comprender el comportamiento estructural de una construcción histórica.

Algunas recomendaciones generales al hacer los análisis son:

- El usuario debe validar y entender cabalmente la herramienta de análisis usada.

- El análisis elástico debe ser una herramienta complementaria o preliminar, pero, cuando sea posible, es mejor realizar modelos de las partes estructurales de una construcción, pues son más fáciles de validar y entender sus resultados, además de que así se reducen costes.
- Por último, ninguna regla o razonamiento general pueden sustituir la experiencia y buen juicio del diseñador.

Este trabajo lo desarrolla el doctor Fernando Peña Mondragón, investigador de la Coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería y es una de las líneas de investigación del Grupo de Monumentos Históricos, el cual es dirigido por el doctor Roberto Meli Piralla, investigador de la Coordinación de Estructuras y Materiales del II UNAM.