



FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS PATRIMONIALES

Pere Roca
Universidad Politécnica de Cataluña

Resumen. *Las estructuras de las construcciones históricas plantean retos específicos al analista debido a la necesidad de conjugar las exigencias de naturaleza resistente con la preservación de sus caracteres históricos y culturales. Modernamente, se reconoce que el fin último de la conservación de todo tipo de patrimonio cultural estriba en la preservación de su autenticidad en términos tanto materiales como intangibles. La estructura que sustenta una construcción histórica constituye asimismo una parte importante del patrimonio y debe ser tratada desde esta misma óptica. Ello conlleva que toda intervención de mantenimiento, reparación o refuerzo deba respetar y hasta potenciar los distintos valores culturales ligados a la propia estructura. En la práctica, estos conceptos llevan a preferir intervenciones muy respetuosas y de carácter mínimo. No obstante, y con el fin de reducir a límites aceptables los riesgos para las personas y para el posible contenido cultural inamovible del edificio, es necesario conciliar el carácter mínimo de la intervención con la satisfacción de un nivel adecuado de fiabilidad estructural.*

Estas ideas se desarrollan a continuación a partir de la consideración algunos documentos internacionales, entre los que cabe destacar el Documento de Nara sobre Autenticidad (1994), y las recomendaciones del comité ISCARSAH. Se presentan asimismo algunas ideas consideradas en la elaboración del Anejo sobre Estructuras Patrimoniales de la nueva versión de la norma ISO 13822 sobre Verificación de Estructuras Existentes, en cuya elaboración ha colaborado el autor.

Affidabilità delle strutture storiche

Pere Roca

Università della Catalogna

Sommario. *Le strutture degli edifici storici presentano all'analista una serie di sfide specifiche, in quanto vi è la necessità di conciliare le esigenze di resistenza con la conservazione delle loro caratteristiche storiche e culturali. Modernamente si riconosce che il fine ultimo della conservazione di ogni tipo di patrimonio culturale risiede nella tutela della sua autenticità sia in termini materiali che in termini astratti. Anche la struttura che sostiene un edificio storico costituisce una parte importante del patrimonio, perciò dev'essere trattata esattamente nello stesso modo. Ciò comporta che ogni intervento di manutenzione, riparazione o consolidamento deve rispettare e persino potenziare i diversi valori culturali legati alla struttura stessa. In pratica questi concetti portano a privilegiare interventi estremamente rispettosi e di portata minima. Ciononostante, e allo scopo di ridurre a limiti accettabili i rischi per le persone e per l'eventuale contenuto culturale inamovibile dell'edificio, è necessario conciliare la portata minima dell'intervento con il raggiungimento di un livello di affidabilità strutturale adeguato.*

Queste idee vengono sviluppate nel presente articolo prendendo in considerazione alcuni documenti internazionali, primi fra tutti il Documento di Nara sull'Autenticità (1994) e le raccomandazioni del comitato ISCARSAH. Vengono inoltre presentate alcune idee sorte durante l'elaborazione dell'Allegato sulle Strutture Patrimoniali della nuova versione della normativa ISO 13822 sulla Verifica delle Strutture Esistenti, alla cui elaborazione ha collaborato l'autore.

1. PATRIMONIO CULTURAL Y AUTENTICIDAD. EL DOCUMENTO DE NARA (1994)

Ante toda posible actuación orientada hacia la conservación o restauración del patrimonio cultural, resulta fundamental identificar en primer lugar los caracteres que motivan la necesidad o el deseo de su conservación (en definitiva, los elementos depositarios de su valor) y que por tanto deben ser respetados de forma prioritaria. Ello constituye un aspecto altamente complejo, pues el valor del legado cultural proviene de aspectos muy distintos y se ve asimismo influida por el contexto cultural. Desde un punto de vista muy general, puede decirse que el valor del patrimonio cultural reside en

- sus méritos técnicos, artísticos y espirituales;
- su contribución a la identidad de las culturas, las regiones del mundo y los pueblos;
- su carácter como documento sobre conocimientos ancestrales, prácticas, cultura, tecnología e historia;
- su aportación como recurso económico en tanto que atracción cultural o turística con gran capacidad para generar economía secundaria
- su importante contribución a la diversidad cultural, al patrimonio cultural mundial y al desarrollo humano

Toda intervención en el patrimonio cultural debe, por tanto, orientarse a conservar y mejorar el valor que éste presenta desde todos estos puntos de vista. Cabe notar que todas las fuentes de valor anteriormente mencionadas descansan en la autenticidad del patrimonio en tanto que legado cultural e histórico. Por ello, y en coherencia con el objetivo de potenciar el valor cultural del patrimonio, toda actuación orientada a su conservación o a su restauración debe tener como objetivo la preservación de su autenticidad. Según se indica en el documento de Nara (1994), “la contribución esencial de la consideración de la autenticidad en la práctica de la conservación es aclarar e iluminar la memoria colectiva de la humanidad”. Este documento, redactado en el marco de un congreso internacional auspiciado por UNESCO e ICOMOS, tuvo por finalidad establecer la importancia de la autenticidad en relación con la conservación del patrimonio cultural mundial.

Así, la autenticidad aparece como el factor esencial en relación a los valores del patrimonio cultural. Su comprensión debe, en consecuencia, desempeñar un papel fundamental en todos los estudios científicos sobre documentación y conservación del patrimonio cultural. El conocimiento y la comprensión de las posibles fuentes de información, en relación a las características originales o derivadas de la historia y de su significado, es un requisito clave para una adecuada evaluación de todos los elementos de la autenticidad.

Según el documento de Nara, es preciso reconocer que el patrimonio cultural es diverso en el tiempo y en el espacio, y que debe ser entendido y valorado desde el respeto hacia las culturas y creencias en las que queda enmarcado. Se reconoce que los juicios sobre la autenticidad y los valores atribuidos al patrimonio cultural pueden

diferir de una cultura a otra, e incluso dentro de una misma cultura. Por ello, no es posible basar los juicios en criterios inamovibles. Bien al contrario, el respeto debido a todas las culturas requiere que la autenticidad y los valores sean juzgados dentro de cada contexto cultural. Por ejemplo, en algunas zonas geográficas, como China y Japón, el mantenimiento de artesanías y prácticas constructivas tradicionales se prefiere, frecuentemente, a la conservación de los materiales originales. En consecuencia, en estos países es relativamente habitual la sustitución del material original por nuevo material (madera, piedra) tratado y colocado de acuerdo con los procesos tradicionales o históricos (figuras 1 y 2).



Figura 1 – La autenticidad, tal y como se entiende en algunos países asiáticos, prioriza la conservación de los oficios y de las tecnologías ancestrales al mantenimiento del material original. La sustitución del material no se experimenta como una pérdida de autenticidad, siempre y cuando su producción y colocación sea realizada a través de procedimientos tradicionales o históricos.



Figura 2 – Desde la perspectiva europea, el material original constituye un aspecto valioso del patrimonio, por lo que su sustitución sólo se plantea en casos de deterioro muy severo.

Los juicios sobre autenticidad pueden vincularse a una variedad de facetas y fuentes de información en función de la naturaleza del patrimonio cultural, su contexto cultural y su evolución en el tiempo. Estas facetas incluyen la forma y el diseño, los materiales, el uso, las tradiciones, las técnicas, el entorno y el significado espiritual para las personas, entre otros factores. La consideración de estas fuentes de valor permite elaborar los valores y las dimensiones específicas del patrimonio cultural a nivel artístico, histórico, social y científico. Por otra parte, el patrimonio cultural incluye tanto valores tangibles como intangibles, pues todas las culturas y las sociedades están enraizadas en formas de expresión tangibles e intangibles, las cuales configuran su patrimonio y deben ser respetadas.

2. ESTRUCTURA Y PATRIMONIO CULTURAL

La estructura, como legado vivo y muestra de una forma resistente viable, ha sido considerada en sí misma como un elemento valioso del monumento sólo en tiempos recientes. El respeto hacia la autenticidad de la estructura implica, a su vez, el respeto hacia sus características mecánicas y sus principios resistentes (figura 3). La aplicación de todos los conceptos anteriormente mencionados a las estructuras históricas no es una tarea fácil debido al carácter complejo de este tipo de patrimonio cultural, caracterizado por sus muchos elementos y potenciales valores relacionados con el material, la geometría, la construcción, la resistencia, la decoración y el contenido artístico, y los usos históricos y presentes, entre otros muchos aspectos.



Figura 3 – Bóvedas cruzadas originalmente atirantadas de la Iglesia de Santa Anastasia en Verona. La autenticidad no está únicamente determinada por los materiales y la morfología originales, sino también por los mecanismos y principios resistentes que caracterizan el comportamiento del conjunto.

En tanto que patrimonio cultural, las estructuras históricas deben ser gestionadas de acuerdo a los principios generales de la conservación y de la restauración. Sin embargo, la aplicación de estos principios a las estructuras no es inmediata debido a varias razones, entre las cuales se halla la necesidad de garantizar una seguridad adecuada para las personas y los bienes muebles o inmuebles de valor artístico-cultural. Garantizar el nivel de seguridad deseado podría dar lugar, en algunos casos, a refuerzos estructurales de alto impacto, susceptibles de provocar una pérdida de valor cultural debido a la posible alteración de los materiales y de las características estructurales originales. La restauración estructural (incluyendo operaciones tales como mantenimiento, estabilización, reparación o refuerzo) tiene en sí un costo potencial en términos de pérdida de autenticidad y de valor cultural, y es esencial entender qué tipo de actuaciones o de tecnologías para la intervención resultan más aceptables con respecto a los principios de la conservación.

Con la finalidad de contribuir a la preservación de los valores ligados a la autenticidad de las estructuras históricas, las Recomendaciones de ISCARSAH (2005), inspiradas en la Carta de Venecia (1964) establecen algunos principios que deben considerarse en cualquier estudio o intervención orientados a su conservación.

Se reconoce, en particular, que el valor de un edificio histórico no reside sólo en la apariencia de los elementos individuales, sino también en la integridad de todos sus componentes, como producto único de una tecnología de la construcción específica de su tiempo y lugar. Por ejemplo, la eliminación de las estructuras internas, conservando sólo la fachada, no satisface los criterios de conservación (figura 4). Además, cualquier intervención en una estructura histórica debe ser considerada desde una visión o planificación global de la restauración de todo el edificio.



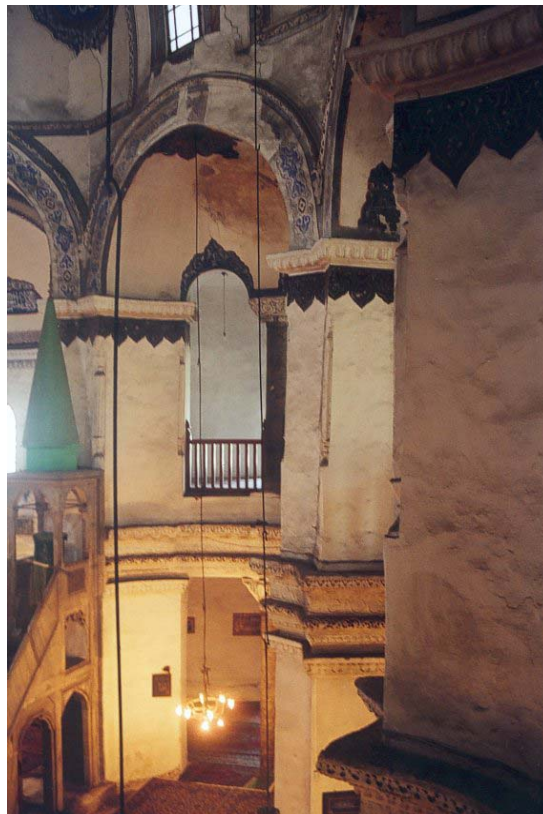
Figura 4 - La preservación exclusiva de la fachada de un edificio antiguo, demoliendo íntegramente los elementos interiores, constituye una práctica claramente contraria a los principios de la conservación del patrimonio arquitectónico en la medida en que menosprecia el valor de la estructura original y de otras muchas facetas del edificio. Fotografías tomadas en Chicago (arriba) y Barcelona (abajo).

Las recomendaciones refieren implícitamente algunos de los valores con los que toda intervención debería ser respetuosa. Según este documento, cualquier operación de

conservación o restauración en el patrimonio arquitectónico deben respetar las siguientes facetas del edificio:

- los materiales originales, la morfología y la organización estructural;
- las características de la estructura derivadas de su forma original;
- el concepto original, los materiales y las técnicas de construcción;
- los posibles modificaciones y alternaciones históricas posteriores
- las alteraciones o imperfecciones de carácter material o geométrico (como deformaciones) que hayan devenido parte de la historia de la estructura, siempre que no comprometan los requisitos de seguridad.
- el contexto de la estructura (sea éste un espacio natural o bien una trama urbana)

En particular, las alteraciones históricas, las imperfecciones y los daños pueden ser identificados como elementos definitorios de valor patrimonial y deben ser respetados cuando no pongan en peligro, como se ha mencionado, el buen comportamiento y la fiabilidad de la estructura (figuras 5 y 6).



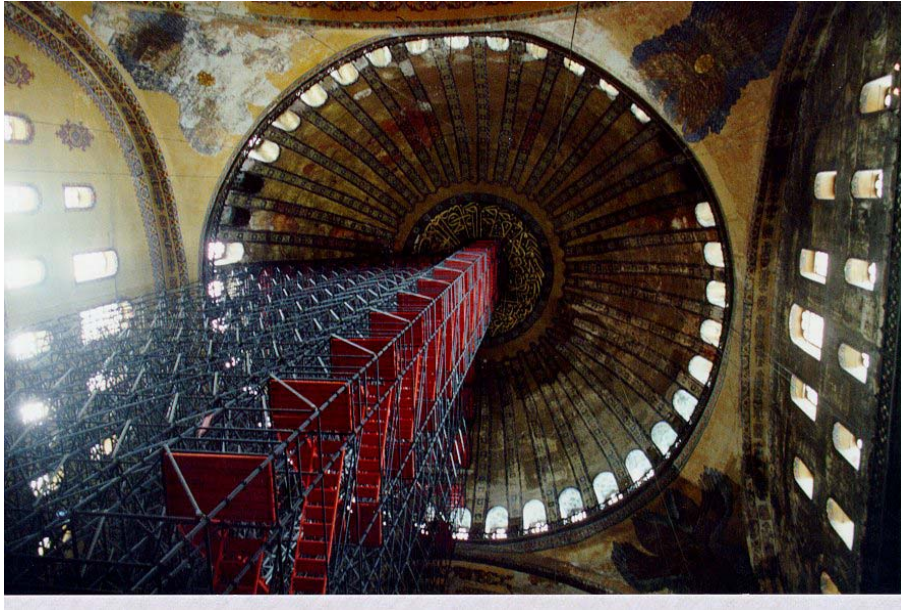


Figura 5 – Arriba: Pilares deformados de la Mezquita Pequeña Santa Sofía (antigua iglesia de San Sergio y San Baco) en Estambul. Abajo: Cúpula visiblemente deformada de la Basílica de Santa Sofía en la misma ciudad. Ejemplos de defectos o alteraciones que han pasado a formar parte de la historia de la propia construcción.



Figura 6 – Daño producido por un proyectil en los muros exteriores de la Basílica de Santa María del Mar en Barcelona, durante la Guerra de Sucesión. Ejemplo de alteración que debería mantenerse como parte de la historia de la propia construcción.

Los aspectos intangibles como el conocimiento, las tecnologías y las habilidades del pasado pueden ser asimismo identificados como elementos definitorios de valor. Debido a ello, es necesario respetar las características arquitectónicas susceptibles de transmitir información sobre valores culturales intangibles. El patrimonio inmaterial puede estar vinculado a la cultura antigua, a las tecnologías de la construcción antigua, a conocimientos técnicos ancestrales, a acontecimientos históricos y a

valores espirituales. Un posible ejemplo reside en los huecos producidos originalmente en muros de mampostería para sustentar dispositivos constructivos tales como andamios y cimbras. Estos huecos son frecuentes en los edificios medievales y deben ser preservados ya que pueden proporcionar una información esencial para la comprensión de los procesos y técnicas utilizados en la construcción (figura 7).

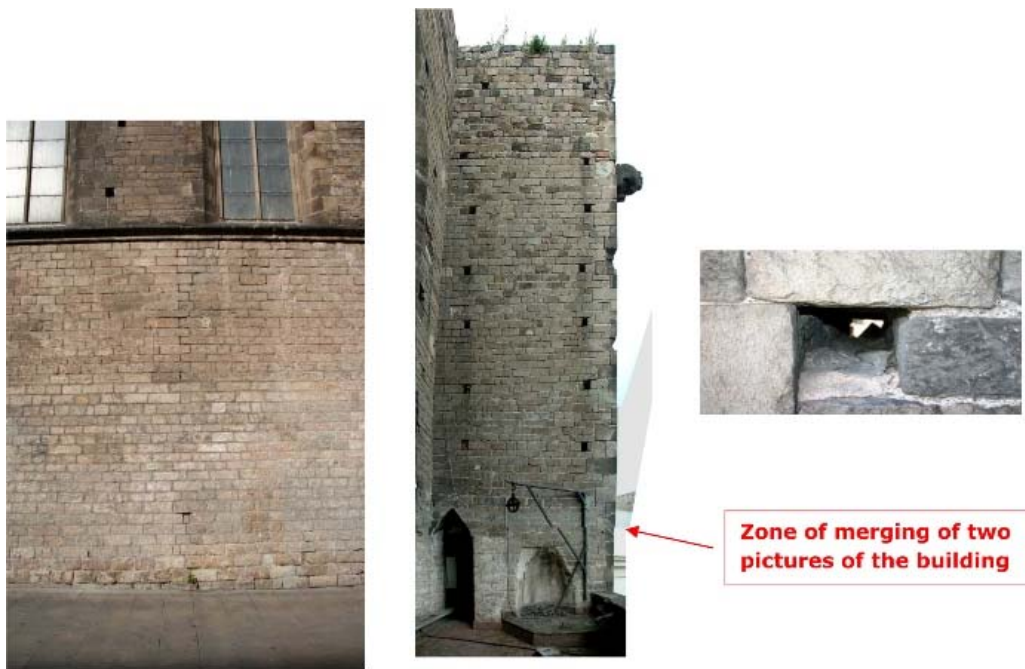


Figura 7 – Basílica de Santa María del Mar en Barcelona. Izquierda: Junta de construcción. Derecha: Huecos originales en contrafuerte para la sustentación de andamios. Elementos que contribuyen a revelar el proceso y las tecnologías utilizadas durante la construcción y que por ello aportan valores intangibles al monumento.

El enfoque moderno de la conservación estructural deriva por tanto del respeto hacia la autenticidad de las características de la estructura (materiales, la morfología, organización general) y de los principios estructurales que rigen su respuesta. Por ello, las estrategias de conservación deben basarse en el conocimiento y la comprensión de la naturaleza resistente de la estructura y las causas reales de los posibles daños o alteraciones. Las intervenciones deben ser mínimas y respetuosas en lo posible, siendo en general preferible utilizar tecnologías de carácter no invasivo y removible (o desmontable) para la reparación o el refuerzo. Además, sólo las intervenciones indispensables son, en principio, aceptables.

Por otra parte, es preciso tener en cuenta que los edificios históricos pueden presentar un contenido artístico fijo, como frescos o pinturas murales, o bien elementos de tipo decorativo que en algunos casos pueden alcanzar un valor cultural extremadamente elevado. En casos de contenido artístico inamovible de alto valor puede ser necesario

priorizar la seguridad de éste introduciendo refuerzos estructurales que podrían considerarse no indispensables o mínimos, o bien no totalmente respetuosos frente a la conservación de la propia estructura. Evidentemente, es preciso sopesar todos los condicionantes e identificar las soluciones que permitan conciliar y satisfacer más óptimamente los distintos requerimientos del problema.

3. ESTUDIO DE LAS CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS. FASES Y ACTIVIDADES

El Comité Científico Internacional para el Análisis y Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (ISCARSAH) de ICOMOS ha elaborado recientemente un conjunto de recomendaciones para el Análisis y la Restauración de Estructuras Históricas (2005). Una parte de las recomendaciones – los principios generales- han sido oficialmente adoptados por ICOMOS en 2003 y han sido traducidos a varios idiomas. Los apartados siguientes están basados en algunas de las principales ideas incluidas en las recomendaciones.

Debido a la complejidad del problema y a las dificultades anteriormente descritas, el estudio de una construcción histórica no puede acometerse desde una óptima exclusivamente calculista. Por contrario, es necesario basar el estudio en la integración de una serie de actividades de naturaleza tanto cualitativa como cuantitativa. Los estudios previos (orientados tanto hacia los aspectos históricos como materiales y estructurales) adquieren una gran importancia, reconociéndose la necesidad de dedicar un considerable esfuerzo (aunque siempre en proporción con la importancia de la construcción y de los recursos económicos disponibles) a la investigación previa y al diagnóstico. El estudio de una construcción histórica constituye una tarea multidisciplinaria que requiere la colaboración de una variedad de profesionales (incluyendo a historiadores, arquitectos, ingenieros, físicos y otros expertos).

Entre las principales actividades que pueden contribuir al estudio y a la caracterización de una estructura histórica están la investigación histórica, la inspección (entendida, en un sentido amplio, como reconocimiento de la estructura en su estado actual), la instrumentación y el análisis estructural (Figura 8). Estas actividades deben desarrollarse de manera complementaria a lo largo de las distintas fases de todo estudio orientado a la conservación del patrimonio arquitectónico, incluyendo a la diagnosis, la verificación de la capacidad y el diseño de una posible intervención. El diagnóstico tiene como finalidad identificar las causas de los daños y caracterizar el estado de conservación de la estructura. La verificación tiene por objeto determinar la aceptabilidad de los niveles de seguridad estructural. La intervención se orienta a restituir o mantener los niveles de integridad y de fiabilidad requeridos a través de posibles intervenciones de estabilización, mantenimiento, reparación o refuerzo.

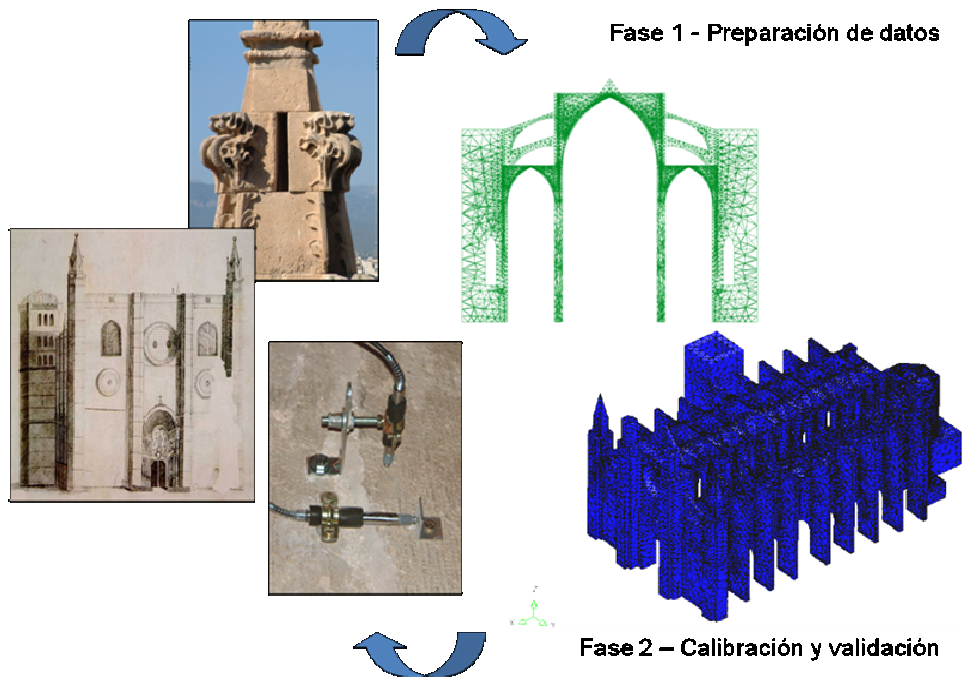


Figura 8: Elementos del análisis (investigación histórica, inspección y análisis estructural) y su interrelación. Las actividades de carácter empírico proporcionan los datos necesarios para el levantamiento del modelo. Una vez disponible, éste debe ser calibrado y validado utilizando de nuevo evidencia proveniente del resto de actividades.

Las tres fases mencionadas (diagnóstico, verificación y diseño de la intervención) deben presentar una relación y coherencia lógicas en relación a objetivos, planteamiento y metodología utilizadas. En particular, el diseño de la intervención debe basarse en una consideración estricta de las conclusiones derivadas del diagnóstico y de la verificación de la capacidad portante.

4. MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural es necesario para caracterizar la respuesta de la estructura bajo diferentes acciones y para cuantificar su resistencia. El análisis estructural implica la adopción de un determinado modelo (ya sea analógico, analítico, numérico...). A su vez, la construcción de un modelo exige la aceptación de un conjunto de hipótesis. En cierto modo, el modelo estructural es el receptáculo de las hipótesis sobre los principios mecánicos que gobiernan el comportamiento de la estructura. El modelo también incluye implícitamente hipótesis sobre las propiedades de los materiales, morfología interna y tipología estructural. Este segundo grupo de hipótesis son necesarias debido a que, a pesar del esfuerzo que pueda invertirse en la inspección y el análisis experimental, no suele ser posible contar con una información muy exhaustiva de las características de la construcción y de sus materiales. La posibilidad de validar o mejorar las hipótesis adoptadas para construir el modelo puede (y debe) proceder de las actividades de carácter experimental ya mencionadas: la inspección (incluyendo ensayos sobre la estructura), la monitorización y la historia, esta última entendida como un experimento ocurrido a escala real

geométrica y de tiempo). La validación del modelo resultara de contrastar sus predicciones con la evidencia experimental o empírica disponible (figura 8).

El análisis estructural ofrece tres aplicaciones distintas: (1) A través del proceso de validación, puede ser posible lograr una idea más clara de las características de la estructura (materiales, morfología, comportamiento estructural). (2) Mediante la simulación de posibles fenómenos que han actuado sobre la estructura (pesos, asentamientos, alteraciones) puede ser posible obtener información sobre las causas que han contribuido al daño. (3) Una vez validado, el modelo puede utilizarse para realizar nuevos pronósticos sobre la respuesta de la estructura bajo diferentes acciones (nuevas sobrecargas, sismos, etc.), con la finalidad de contribuir a verificar su capacidad resistente e identificar las necesidades de refuerzo.

En cualquier caso, hay que reconocer que ningún modelo representa la plena realidad y que las posibilidades de los modelos son siempre limitadas. Los modelos utilizados en la práctica son un compromiso entre el realismo y la simplicidad. Sin embargo, los modelos deben incluir todos los aspectos que se consideren relevantes para describir la respuesta de la estructura, incluyendo, en particular, el daño y la deformación.

5. OBJETIVOS DE LA VERIFICACIÓN

En coherencia con las ideas mencionadas, cualquier intervención deberá contemplar y conciliar los siguientes objetivos

- (1) la conservación de la estructura en tanto que bien patrimonial, de forma respetuosa y compatible con su autenticidad y su valor cultural,
- (2) el mantenimiento o la aportación, en caso necesario, de un nivel de fiabilidad estructural suficiente con el fin de garantizar un adecuado nivel de seguridad a las personas, y
- (3) cuando existe un contenido artístico cultural inamovible, garantizar que la estructura contribuya adecuadamente a conservar este contenido en buen estado (figura 9).



Figura 9 – Colapso parcial de una bóveda de la Basílica de Asís en Italia, provocada por el terremoto ocurrido en 3 de noviembre de 1997. El colapso provocó la pérdida de decoración original de altísimo valor artístico.

En ciertas ocasiones, estos aspectos pueden resultar difícilmente compatibles por ello producir un aparente conflicto. Por ejemplo, las condiciones (2) o (3) podrían llevar a implementar refuerzos que, en medida significativa, alteren los materiales o la configuración original de la estructura e impacten, por tanto, negativamente en su autenticidad y valor cultural. Por tanto, es preciso analizar detalladamente cada caso y determinar aquellas soluciones que resulten óptimas desde la visión global del problema. En general, será preciso contemplar un número de soluciones alternativas y evaluar todas ellas en función del nivel de cumplimiento de las condiciones (1) a (3). Cuando estas condiciones no puedan cumplirse simultáneamente, deberá procederse a seleccionar una solución óptima en función de un criterio global que priorice o pondere adecuadamente los distintos requisitos.

En general, en el estudio y en la intervención en construcciones históricas, debe evitarse enfoques excesivamente cautelosos o conservadores debido a que podrían motivar niveles de intervención innecesarios con una pérdida significativa (y asimismo innecesaria) de valor cultural (figura 10). Salvo en el caso en que exista de un contenido artístico inamovible de alto valor, puede resultar aceptable, para situaciones extraordinarias (como terremotos), que la estructura experimente un cierto nivel de daño, siempre y cuando éste sea reparable de forma respetuosa y compatible con la propia naturaleza material y constructiva de aquélla. De esta forma, puede resultar posible reducir el alcance e impacto de la misma intervención. Por ejemplo, en estructuras de obra de fábrica de piedra, puede resultar aceptable la aparición de daños (principalmente fisuras) que puedan repararse mediante el

rejuntado, sustitución puntual de bloques o reconstrucción local mediante materiales históricos o tradicionales como piedra y mortero de cal.



Figura 10 – intervenciones de muy alto coste en forma de pérdida de valor cultural irreversible debido a una excesiva alteración de los materiales y estructura originales. Las bóvedas y arcos de la fotografía superior fueron revestidos con hormigón proyectado tras la colocación del refuerzo observable.

En un sentido amplio, es preciso tomar las decisiones a partir de un análisis de coste y beneficio, donde el beneficio reside en la reducción de la probabilidad de que la estructura experimente daños y destrucción ante nuevos terremotos u otras acciones extraordinarias, mientras que el coste está en la alteración y pérdida de valor que la propia intervención puede acarrear.

Cuando el tercer aspecto (3) resulte tener mucha importancia (como en el caso de iglesias o palacios decorados con pinturas o frescos de muy alto valor aplicados sobre la estructura), cabrá establecer condiciones que limiten la deformación o el daño aceptables en la estructura con la finalidad de impedir el deterioro del contenido cultural inamovible. Ello puede formalizarse introduciendo, además de los estados límite relacionados con la seguridad, un estado límite de servicio relacionado con la deformación.

Además de las acciones extraordinarias, también puede suceder que acciones frecuentes, como sobrecargas de uso, puedan requerir actuaciones de refuerzo importantes en el edificio. Ello podría ocurrir ante cambios de uso o bien como consecuencia de procesos de deterioro que afectaran a los materiales estructurales. En estos casos también podría ocurrir que la implementación de los refuerzos necesarios tuviera un alto coste en términos de autenticidad o de valor cultural. En situaciones de este tipo, puede ser conveniente reconsiderar los usos previstos o bien considerar unos usos alternativos, menos exigentes para la estructura, con la finalidad de permitir un nivel mayor de protección del valor patrimonial.

En algunos casos, la protección del valor patrimonial puede incluso llevar a la aceptación de niveles de fiabilidad más bajos que los implícitamente aceptados en las normativas de diseño estructural. En estos casos, será preciso tomar medidas paralelas con el fin de limitar las consecuencias de un fallo estructural sobre las personas y el posible contenido artístico inamovible. Por ejemplo, cabe restringir los usos aceptados o bien limitar el número de personas que utilizan el edificio en un momento dado.

6. POSIBLES ENFOQUES PARA LA VERIFICACIÓN

Como parte de un estudio de una construcción histórica, la verificación requiere un planteamiento amplio y no sólo basado en la aplicación de códigos o cálculos estructurales convencionales. El estudio puede, como en la fase de diagnóstico, explotar la evidencia cualitativa en combinación con la cuantitativa. Tal y como se indica en las Recomendaciones del Comité ISCARSAH, el arquitecto o ingeniero encargado de verificación de la capacidad resistente de un edificio histórico no debiera verse legalmente obligado a basar sus decisiones únicamente en los resultados de los cálculos.

Al igual que para el diagnóstico, la verificación requiere la combinación de distintas investigaciones. Su combinación producirá el mejor resultado posible (las mejores conclusiones posibles) sobre la base de los datos disponibles. Los enfoques a ser

considerados son, en esencia, los enfoques histórico, cualitativo, experimental y analítico.

Enfoque histórico. Como ya se ha indicado, la historia puede entenderse como un ensayo llevado a cabo a escala real geométrica y de tiempo. La investigación de los registros históricos puede revelar hechos importantes en relación con la resistencia y desempeño pasado o histórico de la edificación. Profundizar en el desempeño en el pasado puede proporcionar indicios o evidencia sobre la capacidad de la estructura para resistir distintas acciones tanto frecuentes como extraordinarias, como sismos.

Enfoque cualitativo. Otro enfoque (el cualitativo) resulta de analizar la respuesta resistente de una serie de edificios similares al que se está estudiando. El comportamiento de otros edificios se evalúa empíricamente ante posibles acciones ya experimentadas (por ejemplo, se analiza el efecto de los terremotos en edificios existentes) y las correspondientes conclusiones se extienden, en la medida posible, al caso del edificio en estudio. La validez de la extrapolación debe ser juzgada por el analista en función de las semejanzas existentes entre los edificios y la magnitud de las acciones. En cualquier caso, debe existir suficiente similitud en términos de dimensiones, tipología estructural, morfología y materiales.

Enfoque experimental. Una evaluación directa de la capacidad resistente puede ser obtenida mediante ensayos (como pruebas de carga) in situ. Es preciso tener en cuenta que el objetivo de estos ensayos no es la identificación de las propiedades mecánicas (como en el caso del diagnóstico), sino la capacidad de la estructura para resistir una acción real. Ensayos directos con cargas importantes difícilmente pueden ser realizados en toda la estructura; más habitualmente, el enfoque experimental se utiliza para evaluar la capacidad de elementos individuales, tales como losas de piso, bóvedas o escaleras, para resistir una cierta carga vertical. Debido a dificultades y riesgos inherentes, las pruebas de carga directa tienen una aplicabilidad más bien limitada.

Enfoque analítico. En comparación con el enfoque cualitativo, un procedimiento inductivo, el enfoque analítico constituye un proceso deductivo. La información sobre la estructura, la morfología y las acciones se utiliza para la construcción de un modelo estructural; el modelo, a su vez, se utiliza para deducir (predecir) la respuesta resistente del edificio. El modelo puede Obviamente, la capacidad predictiva de un modelo depende del nivel de la fiabilidad de los datos utilizados y el esfuerzo invertido en su calibración o validación.

7. INCERTIDUMBRE Y JUICIO INGENIERIL

A pesar del esfuerzo que pueda dedicarse a la investigación de la estructura, siempre quedará un cierto margen para la subjetividad y la incertidumbre debido a inevitables limitaciones relacionadas con la obtención de datos y métodos de análisis aplicados. Particularmente, puede prevalecer cierta incertidumbre debido a aspectos tales como la heterogeneidad de los materiales, la complejidad de los detalles constructivos, el

nivel de deterioro realmente existente u otros aspectos que un modelo de coste razonable difícilmente puede recoger de forma detallada. Por otra parte, los métodos de análisis se fundamentan en hipótesis que frecuentemente suponen fuertes simplificaciones en la descripción de los fenómenos mecánicos y resistentes reales que caracterizan en comportamiento de los materiales o de la estructura en su conjunto. Estas incertidumbres pueden comprometer fuertemente a la validez de las conclusiones del estudio. En el mejor de los casos, estas incertidumbres dificultan la viabilidad de una medida absoluta y objetiva de la fiabilidad estructural, la cual resulta frecuentemente imposible.

La utilización de modelos numéricos con fines predictivos conlleva inevitablemente administrar de cierta incertidumbre. Como ya se ha mencionado, el modelo estructural, elaborado a partir de cierta cantidad de datos, debe ser validado mediante la comparación de algunas de sus predicciones con evidencia de tipo empírico proporcionada por la investigación histórica, la inspección o la instrumentación. Para ello, el modelo se utiliza con la finalidad de simular el comportamiento de la estructura bajo situaciones para las cuales su respuesta resulte (al menos en parte) conocida. Por ejemplo, podría realizarse una comparación de la fisuración que el modelo predice para carga gravitatoria, y comparar este resultado con el estado real de fisuración exhibido por la estructura en la situación presente. Existen otras posibilidades de gran interés como pruebas dinámicas o ensayos de medida de tensiones in situ (hole-drilling, gato plano) que asimismo pueden ser utilizados para la calibración a través de la comparación de resultados numéricos y experimentales. Una comparación satisfactoria podría llevar a considerar el modelo (parcialmente) validado. Sin embargo, la finalidad última del modelo reside en la predicción de aspectos que realmente no son conocidos a priori (por ejemplo, y en muchos casos, la determinación de la capacidad sísmica). Por ello, la rentabilización del modelo implica su utilización para el estudio de respuestas ante situaciones o acciones distintas a las que han sido consideradas para su validación (figura 11). En algún sentido, el uso del modelo con finalidad verdaderamente predictiva implica extrapolar los límites de la validación y usar el modelo para situaciones en las que ésta no es posible.

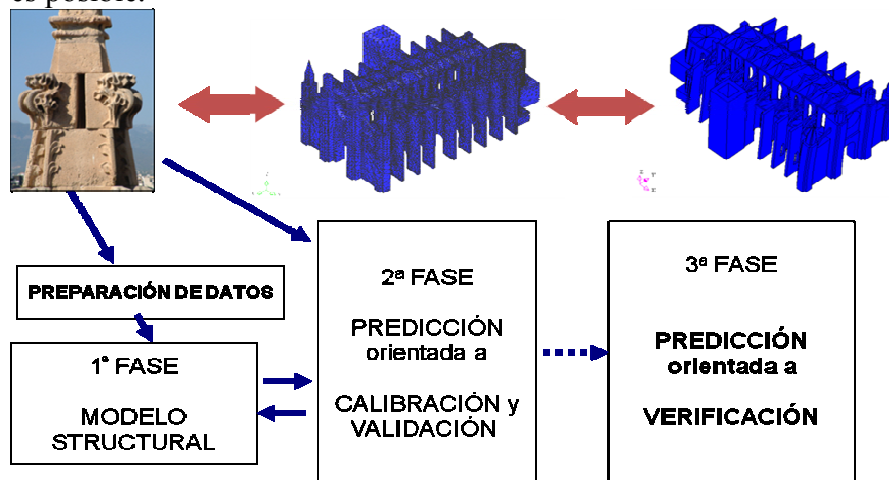


Figura 11 - Distintas fases implicadas en el uso del modelo estructural. Una vez validado, este será utilizado (entre otros aspectos) para predecir el comportamiento ante distintas acciones y, en particular, verificar la capacidad de la estructura.

En definitiva, y con el fin de contrarrestar las incertidumbres existentes, las conclusiones últimas deben descansar en el juicio ingenieril, en cuya elaboración será importante tomar en consideración todos los enfoques anteriormente mencionados (enfoques comparativo, histórico, experimental y analítico) con la finalidad de alcanzar un conocimiento de carácter integrado. Tal y como se ha mencionado, el enfoque analítico no es suficiente por sí mismo y debe ser contrastado o aplicado en combinación con los otros posibles enfoques.

La existencia de un cierto espacio para la incertidumbre y la subjetividad es algo que debe ser reconocido y valorado junto a los resultados del estudio. Las recomendaciones de ISCARSAH invitan por ello a elaborar un informe explicativo, a propósito del estudio de toda construcción histórica, en que se realice un análisis crítico y una discusión detallada de los resultados. Este informe debe incluir un análisis detallado de la fiabilidad de la estructura, y de sus posibles carencias, a fin de justificar la intervención. El informe debe asimismo explicitar las fuentes de posible incertidumbre e incluir un análisis de la fiabilidad de los datos y de las hipótesis consideradas.

8. CONCLUSIONES

Las estructuras históricas tienen un valor cultural y patrimonial en sí mismas, por lo que deben ser conservadas como tales y no únicamente como soporte del resto del material histórico o cultural contenido en el edificio. El valor cultural de las estructuras, como en el patrimonio cultural en general, viene reforzado por la autenticidad de sus caracteres distintivos (materiales, morfología, organización, mecanismos resistentes) los cuales, por tanto, deben ser respetados y, en su caso, restaurados en coherencia con los principios de la conservación.

Toda actuación debe partir de un conocimiento muy profundo de las características de la estructura y de sus posibles problemas. Este conocimiento no puede obtenerse únicamente a partir del análisis estructural y debe también apoyarse en otras actividades de carácter tanto cualitativo como cuantitativo, entre las que se hallan la investigación histórica, la inspección y la instrumentación. Es preciso desplegar esta visión amplia y polifacética a lo largo de todo el estudio, extendiéndola en particular a las fases de diagnóstico, verificación y diseño de la intervención.

A pesar de ello, y a pesar del esfuerzo que pueda dedicarse a la preparación y validación de los modelos de análisis, las conclusiones pueden verse afectadas por un nivel importante de incertidumbre y subjetividad como consecuencia de limitaciones inherentes a los datos disponibles y a la precisión de los modelos de análisis. Ello sólo puede contrarrestarse mediante un afinado juicio ingenieril que, además de los resultados del análisis estructural, considere la evidencia obtenible a través otros enfoques, como el análisis comparativo y la investigación del comportamiento de la estructura en el pasado.

REFERENCIAS

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

ICOMOS / ISCARSAH Recomendaciones para el Análisis y restauración de estructuras históricas. ISCARSAH-Comité Internacional sobre Análisis y restauración de estructuras del patrimonio arquitectónico, ICOMOS, 2005.

ISO 13822: 2001 Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO/TC98, ISO, Ginebra, 2001.

Nara Document on Authenticity. Nara Conference on Authenticity in Relation to the World Heritage Convention, Nara, 1994.