

Métodos de Análisis de Cargas en Patrimonio Arquitectónico

J. BARRALLO CALONGE; S. SÁNCHEZ BEITIA (*)

RESUMEN El artículo trata de realizar una descripción comparativa sobre los métodos experimentales existentes para la deducción de los esfuerzos que soportan los elementos portantes en construcciones del Patrimonio Arquitectónico. Se enmarca en la necesidad de comprobar experimentalmente los modelos matemáticos empleados, basados fundamentalmente en el método de los Elementos Finitos. Las técnicas que se referencian son: el método de Difracción de Rayos-X, el denominado de los "Gatos Planos" y el de Hole Drilling (Método Donostia en Patrimonio Arquitectónico).

STRESS MASUREMENTS ON ARCHITECTURAL HERITAGE

ABSTRACT *This paper deals about the experimental techniques to measure the real stresses supported by structural elements on Architectonical Heritage. The authors consider that this measurements are necessities to test the analytic methods. Three experimental methods are mentionned. The firts one is the X-Ray Diffraction method useful on metallic materials. More emphasis is made about both the "Flat Jacks" technique and the Hole Drilling method (named Donostia Method in this kind of structures).*

Palabras clave: Gatos Planos; Hole Drilling; Método Donostia; Patrimonio Arquitectónico.

INTRODUCCIÓN

En multitud de análisis previos a un Proyecto de Intervención en Patrimonio Arquitectónico, se emplean corrientemente diversos modelos analíticos para el análisis de cargas mediante aplicaciones informáticas de altas prestaciones, adoleciéndose de unos resultados experimentalmente fiables que confirmen el estado de cargas. Los autores entienden que esta comprobación experimental es indispensable para postular unas directrices adecuadas de índole estructural en un Proyecto de Intervención.

El artículo se enmarca en los análisis previos a una intervención en construcciones del Patrimonio incluyendo bajo este concepto lo puramente arquitectónico y lo considerado Obra Civil. Los métodos y técnicas que se detallan, debido a su carácter experimental, deben de ser aplicadas con un criterio muy definido al igual que sucede con el resto de actuaciones sobre un Monumento. La deducción experimental de cargas exige una cuantificación experimental previa de alguna magnitud "observable" (p.e. la deformación o mejor el desplazamiento). Los métodos más conocidos y empleados, salvo los fundamentados en difracción de rayos-X o velocidad de propagación de ultrasonidos, requieren de una metodología por la cual se elimina una parte del material del elemento portante analizado. Estamos ante una situación donde se produce un aumento del "daño" del Monumento. Es decir el sistema queda alterado al analizarlo; el grado de destrucción sobre el Monumento debe de ser tenido en cuenta.

Este concepto de "daño" debe de ser considerado como una traducción literal del concepto anglosajón de Damage, que en la ciencia de la Mecánica de la Fractura es el parámetro que define el grado de aproximación al colapso de un material en determinadas situaciones. Probablemente este concepto podría ser el adecuado si se abriera una línea de investigación en el que se aplicara la Mecánica de la Fractura a este tipo de estructuras. Otros parámetros tales como Factor de Intensidad de Tensiones, Integral-J, etc... pierden su sentido.

DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES HABITUALMENTE EMPLEADAS

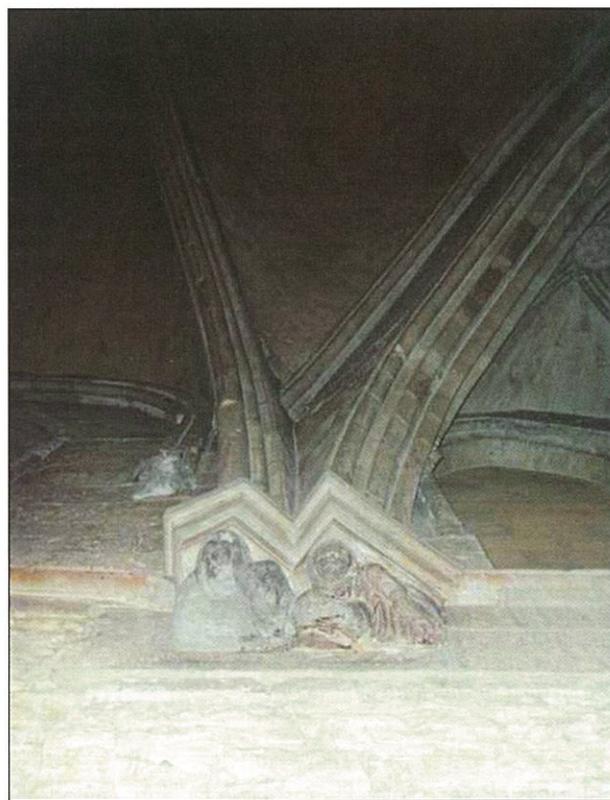
En la Comunidad Científica y en la Industria se utilizan, en la práctica totalidad de los casos, los métodos de Difracción de Rayos X y Hole Drilling con extensómetros para la medida de las Tensiones Residuales. Estas tensiones internas, remanentes e inherentes al material, están originadas por los procesos de fabricación y acabado de cualquier pieza o elemento estructural, debiendo de ser sumadas a las nominales de diseño para conocer el estado real de tensiones en servicio. Las Tensiones Residuales pueden ser del orden del Límite Elástico del material por lo que se puede comprender el esfuerzo para poner a punto técnicas para su deducción. Por otra parte, en Obra Civil se emplean bandas extensométricas ("comparadores" en algunos casos) para analizar las deformaciones en la "Prueba de Carga". El problema que presenta una estructura en servicio es que los esfuerzos que soporta están ya aplicados, es decir es una carga que no está por aplicar. Consecuentemente se pueden considerar como "residuales" a efectos de encontrar un método para cuantificarlos, hipótesis asumida por los autores en la puesta a punto del Método Donostia.

(*) E.T.S. de Arquitectura, Campus de Ibaeta, 20009 San Sebastián.

El método de Difracción de Rayos X (Referencia 1) es útil fundamentalmente en materiales metálicos, aunque se conocen algunas aplicaciones en cierto tipo de composites. Se basa en la medida de las variaciones de la separación de los planos cristalográficos del material en función de la carga (magnitud ingenieril). Es preciso recordar que el fenómeno de difracción de Rayos-X es puramente cuántico no explicable mediante conceptos de la física newtoniana o clásica.

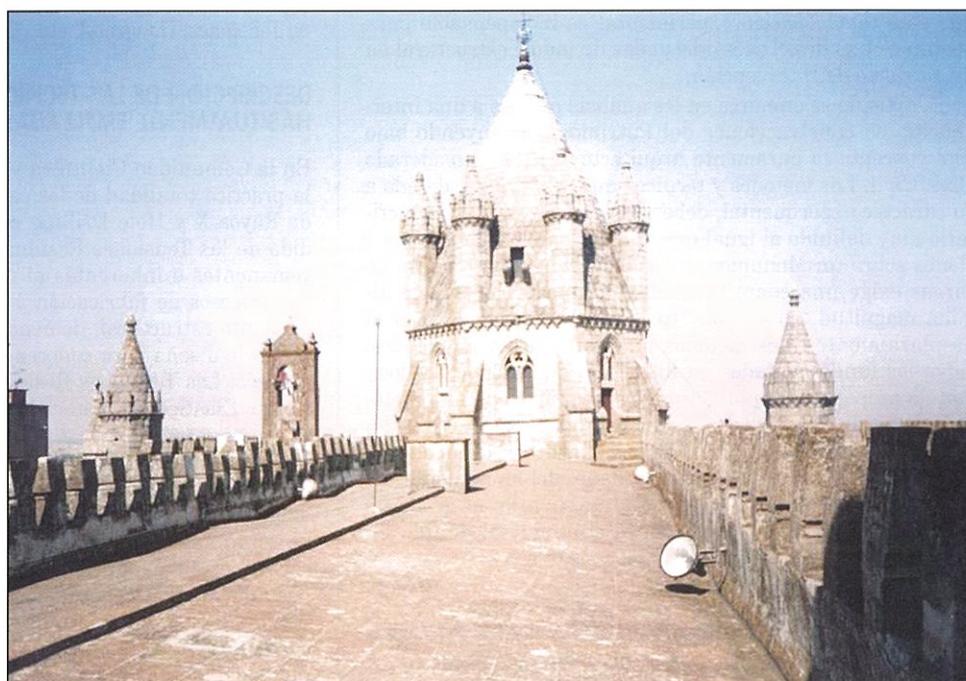
El otro método más utilizado para la deducción de las Tensiones Residuales es el denominado Hole Drilling, empleado desde hace varias décadas basándose, en su praxis más habitual, en registrar las deformaciones que experimentan unas bandas extensométricas (galgas) cuando se elimina por taladrado un redondo de material. Las galgas se colocan adheridas a la superficie y de modo concéntrico con la extracción a realizar. Esta técnica se emplea en todo tipo de materiales y se han publicado miles de artículos y trabajos sobre su uso e incluso hay desarrollada una Norma de Empleo (Referencia 2) por la American Society for Testing Materials (ASTM).

Los autores denominan a la técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico como Método Donostia (Referencia 3). La técnica Hole Drilling permite a priori deducir el tensor de tensiones y por consiguiente las tensiones principales y su dirección. Añadido a esto el material que se extrae es un redondo de 3.2 cm de diámetro y 4.4 cm de profundidad, por lo que puede considerarse una técnica quasi-no-destructiva. De la revisión de los Proceedings de los congresos internacionales International Conference on Residual Stresses (ICRS) 1,2,3,4 y 5 (2000 ponencias), International Conference on Mechanics (ICM) 1 a 8 (4000 ponencias), Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings (Strema) 1,2,3,4 y 5 (700 ponencias), y de las revistas Experimental Mechanics (43 volúmenes, 2300 artículos), Experimental Techniques (100 artículos), Ingeniería Civil (300 artículos), Strain y otras de menor entidad y difusión, sólo han aparecido dos artículos sobre



FOTOGRAFÍA 1. Catedral de Oviedo.

el empleo de la técnica Hole Drilling para la deducción de esfuerzos ya aplicados, no residuales. En ambos casos se analizaban los esfuerzos del terreno en la construcción de un túnel bajo el mar de Japón, entre dos islas de dicho País. Así mismo se han revisado y consultado las publicaciones del CETIM (Francia) y las Tesis Doctorales del EN-



FOTOGRAFÍA 2. Cubierta de la nave central de la Catedral de Evora (Portugal).

SAM (Francia) sobre la técnica Hole Drilling. Esta revisión bibliográfica permite afirmar que la técnica Hole Drilling no ha sido aplicada en el Patrimonio Arquitectónico aun cuando el método se encuentra perfectamente desarrollado. Por último, es preciso mencionar que se conoce de alguna utilización puntual de la técnica Hole Drilling en Obra Civil y en Edificación por parte de algún experto en este campo, no disponiéndose de las referencias concretas, probablemente por su no publicación debido a la dispersión de los resultados obtenidos.

Actualmente se emplea la técnica de los "gatos hidráulicos planos" para deducir cargas verticales (Referencia 4) en construcciones del Patrimonio Arquitectónico. Este método conceptualmente análogo al anterior por cuanto supone una eliminación de material, consiste en practicar un corte horizontal sobre un elemento estructural y registrar la contracción experimentada entre puntos prefijados encima y debajo del corte. Inyectando un fluido dentro del corte hasta recuperar la distancia inicial entre puntos, se registra en un manómetro su presión, deduciéndose la carga vertical que soporta el material.

CRÍTICA DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CARGAS

MÉTODOS ANALÍTICOS: BREVE DESCRIPCIÓN Y CRÍTICA

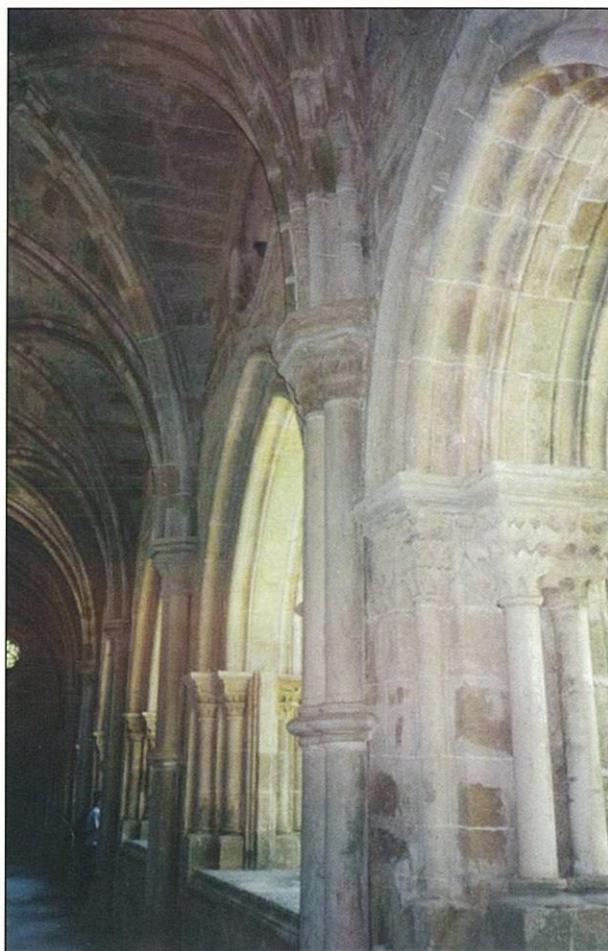
Muchos de estos métodos tienen su origen en la teoría matemática de los Elementos Finitos y su empleo se realiza mediante aplicaciones informáticas comerciales de altas prestaciones. Como es bien conocido se trata de discretizar un elemento portante a diferencia del método de las diferencias finitas en el que se discretiza un fenómeno, no quien lo soporta. El uso correcto de estas aplicaciones informáticas requiere definir las características mecánicas del elemento, decidir el grado de discretización del volumen analizado y por último establecer unas condiciones de contorno por las que se estipulan las interacciones mecánicas del elemento analizado con el resto de la estructura. Se precisa consecuentemente de una gran experiencia para aplicar coherentemente estos métodos. Salvo una comprobación experimental del modelo, sus resultados deben de considerarse cualitativos.

Bajo este epígrafe puede mencionarse el método de Estática Gráfica mediante el cual se analiza la transmisión de cargas (pesos) a través de un elemento portante previamente discretizado. Este método es ampliamente utilizado por el Arquitecto Dn. Francisco Jurado.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

La técnica denominada "Gatos Planos" tiene a juicio de los autores tres inconvenientes. Por un lado, la carga que se mide es la proyección sobre la vertical del tensor de tensiones del material, y consecuentemente es útil sólo cuando los esfuerzos son razonablemente verticales, puesto que quedan enmascaradas otras componentes de dicho tensor. Otro problema es que es destructiva para el material, sobre todo en pilares y en machones de fachada, y éste es un aspecto clave a considerar en Patrimonio Arquitectónico. Por último, no puede obtener en ningún caso un estado de cargas a tracción. A pesar de estos inconvenientes esta técnica tiene la ventaja de su aplicabilidad en elementos portantes de ciertas dimensiones y sobre todo donde la transmisión de cargas sea razonablemente vertical. Posiblemente la mayor de las ventajas es su aplicabilidad a todo tipo de materiales y fábricas.

El Método Donostia o técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico tiene la particularidad de ser un método



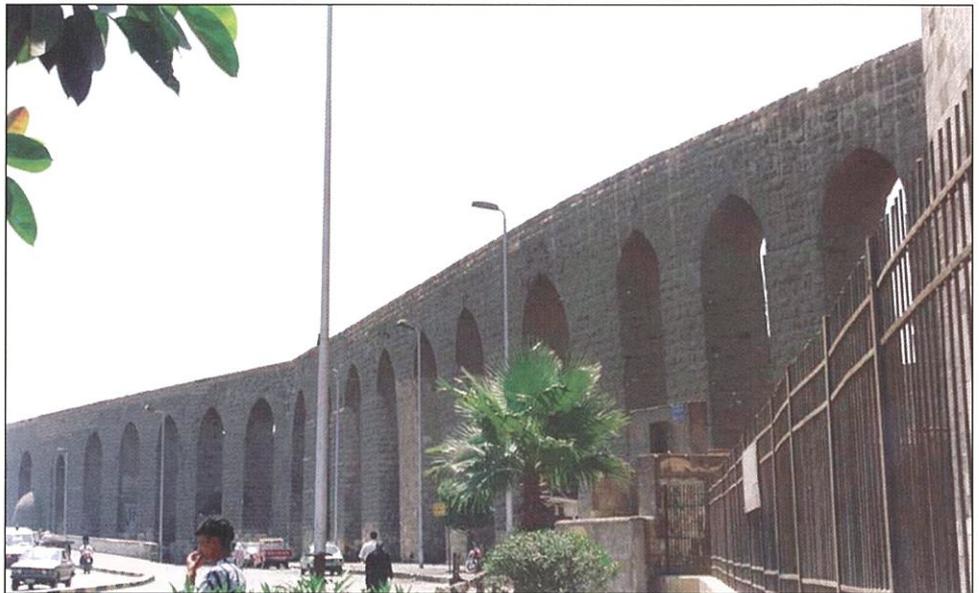
FOTOGRAFÍA 3. Claustro de la Catedral de Evora (Portugal)

quasi-no-destructivo. Esto es fundamental en pilares, columnillas (de ventanales por ejemplo) y en general en elementos portantes de medianas y pequeñas dimensiones puesto que se elimina un redondo de 3.6 cm de diámetro y 4 cm de profundidad. Por otra parte permite deducir tensiones principales y su dirección a compresión y tracción. Por último, el método se basa en una técnica ampliamente conocida (Hole Drilling) y se emplea con equipos standard.

No obstante, el método requiere de una gran laboriosidad. Es preciso elaborar "in situ" las rosetas y el cableado de medida. No existen accesorios standards para el método requiriéndose de experiencia previa en su aplicación. En cuanto a las limitaciones mencionar que se ha empleado únicamente hasta el momento en sillares o en elementos similares de mampostería y se necesita una superficie accesible y libre de al menos 20 cm x 20 cm. No se ha empleado en zonas con dos elementos (por ejemplo mortero y sillar a la vez) ni en fábricas de ladrillo.

CONCLUSIONES

Todas las técnicas puestas a punto por la Comunidad Científica para la deducción de los esfuerzos que soporta en servicio un elemento estructural son necesarias y complementarias habiendo sido probadas en las más diversas situaciones. No obstante cada una de ellas debe de ser aplicada en los casos donde su utilidad sea la adecuada. La técnica de los Gatos Planos puede ser aplicada en una gran



FOTOGRAFÍA 4. Acueducto del Sultán El-Ghuri (El Cairo)

cantidad de situaciones. Las ventajas de la técnica, descritas anteriormente, definen esas situaciones. El Método Donostia será aplicable donde la transmisión de cargas sea anómala, bien por la presencia de flexiones o bien en análisis "locales". El método es imprescindible en elementos de reducidas dimensiones.

Los métodos analíticos serán útiles cuantitativamente cuando sean corroborados experimentalmente. En estos casos se trata de comprobar un modelo de comportamiento que reproduzca la realidad experimental en ciertos puntos previamente definidos. Una vez realizado este análisis su extrapolación o interpolación a los demás puntos de la estructura será fiable.

En elementos metálicos, evidentemente no habituales en Patrimonio, las técnicas de Difracción de Rayos-X y Hole Drilling son las únicas aplicables. Los autores consideran que la primera es la más adecuada puesto que es totalmente No Destructiva.

REFERENCIAS

- 1.- SANTIAGO SÁNCHEZ BEITIA. "Tensiones Residuales y Tensiones por Difracción de Rayos-X" (Libro). Servicio de Publicaciones de la Universidad del País Vasco (1990), Lejona (Vizcaya).
- 2.- E 837-95 Standard. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gage Method*. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (USA, 1995).
- 3.- BARRALLO, J., ZULUETA, A. and SÁNCHEZ BEITIA, S., "Stress Measurements on Ancient Structures by the Hole Drilling Method", *Experimental Techniques Rev.*, Vol.19 ,Nº 3, Society for Experimental Mechanics, Bethel (USA), (1994),9-13.
- 4.- ASTUDILLO, R. and GARCÍA-RUIZ, P., "El ensayo del Gato Plano como técnica de auscultación in-situ de obras de fábrica", *Ingeniería Civil*, 98, Cedex, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid (Spain), (1995), 25-35