

# **PATOLOGÍA DE BÓVEDAS. ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE VARIABLES A HIPÓTESIS DE PARTIDA**

**V. Alegre<sup>1</sup>, X. Alegret<sup>2</sup>, Valentí Ródenas<sup>3</sup>**

1 COTCA. Director Técnico. Profesor Asociado de la U.P.C.

2 COTCA. Director del Departamento de Estudios

3 COTCA. Director del Departamento de Patología

## **RESUMEN**

En el estudio de daños en bóvedas, para analizar su comportamiento son importantes la geometría, la modelización y la instrumentación en el tiempo para definir el riesgo, y en su caso soluciones para su estabilización.

Una herramienta importante para tecnificar la respuesta es el estudio de sensibilidad de las variables que intervienen a las hipótesis de partida del modelo para su validación. Se presenta el caso de una bóveda de ladrillo cuatrimpartita sobreapoyada, con desplazamientos en un pilar sin contrafuertes, estudiando la sensibilidad de las variables que intervienen (desplazamientos, módulos de deformación de las fábricas, grados de empotramiento de los nudos, ...). El estudio de sensibilidad ha permitido acotar el riesgo de las variables que intervienen y proponer soluciones de reparación.

## **SUMMARY**

In the study of damages in vaults, geometry, modelation and instrumentation in the time are very important to understand their behavior and to define the risk, and if it is necessary to find out solutions for their stabilization.

An important tool to technify the answer is the sensitive study of the variables that take part to the departure hypotheses of the model for their validation. The case of a fourparted brick overstressed vault is presented, with displacements in a column without abutments, studying the sensitivity of the variables that take part (displacements, modules of deformation of the brick, joint's degrees of clamping...). The sensitivity study has allowed to limit the risk of the variables that take part and of proposing repair solutions.

## INTRODUCCIÓN

Para el estudio de daños en bóvedas de ladrillo cocido, donde es muy difícil recurrir a ensayos que permitan entender su funcionamiento y cuantificarlo técnicamente, es importante conocer la influencia que tienen en la respuesta del conjunto estructural las variables más importantes que intervienen, porque de esa forma se puede avanzar en la identificación de riesgos, su definición, y las propuestas de actuación.

Se estudia el caso particular de una bóveda cuatrimpartita de obra cocida del siglo XVI, que se rehabilitó colocando cargas importantes sobre la misma, lo que dio lugar a un aumento de los daños en la bóveda, y el riesgo de colapso en un pilar de sustentación sin contrapeso horizontal.

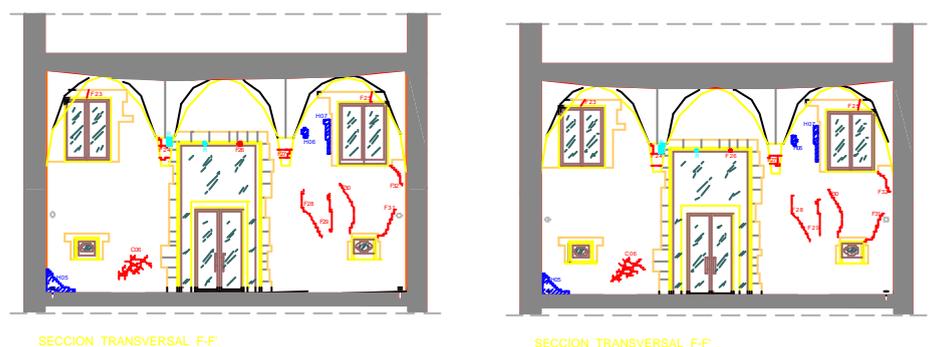
Una vez realizada la toma de datos de los daños, para analizar el riesgo de los mismos se modelizó la bóveda, y se estudió cómo variaba su comportamiento suponiendo distintos módulos de elasticidad para la fábrica de piedra, y distintas condiciones de contorno para el pilar de sustentación que la aguanta sin contrapeso.

A partir de lo anterior, de la respuesta real de la estructura y de la instrumentación realizada, se está en condiciones de acotar el riesgo y definir propuestas de actuación con criterio técnico.

## DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

Se trata de un palacio fortificado del siglo XVI. El edificio es de planta sensiblemente cuadrada de unos 30 metros de lado, con planta semisótano, baja, altillo y piso. Posteriormente en la rehabilitación del conjunto (1993) se levantó una planta más.

En el vestíbulo de planta baja existen tres bóvedas cuatrimpartitas de obra cocida de 14x29x 3 cm. colocada en pliegue de libro dibujando rombos en los encuentros entre bóvedas.



*Figura 1. Secciones de las paredes y pilares de apoyo de las bóvedas cuatrimpartitas y catálogo de daños.*

*Foto 1: Vista general del apoyo de las bóvedas cuatrimpartitas en la pared de la fachada.*

Los senos están rellenos de cascotes y arena. Inicialmente el grupo de tres bóvedas estaban atadas por dos tensores metálicos anclados a la fachada principal y a dos pilastras (figuras 2 y 3). Actualmente sólo quedan las cabezas de los tensores.

La bóveda que se analiza cubre un tramo rectangular de dimensiones 10,5 m x 12,5 m y está dividida a su vez en tres bóvedas iguales de dimensiones 10,5 x 4,16 m.

Posteriormente (1993) entre las medidas de urgencia para evitar la ruina del inmueble se construyó una losa de hormigón armado de 25 cm de canto encima de la bóveda del vestíbulo de entrada para, según el proyecto, “sustituir la actual función resistente de las bóvedas y contribuir a atar estructuralmente los muros y las bóvedas dándoles solidez y parando su progresivo deterioro”. Por debajo de la losa se colocó una capa de poliestireno expandido de 3 cm en contacto con el relleno de tierras y cascotes.

La bóveda se apoya sobre el muro de fachada de un metro de espesor de mampostería interior y sillares exteriores; lateralmente apoya sobre paredes de mampostería de 65 ó 70 cm, y sobre una pilastra de piedra y mampostería de 100 x 100 cm.

## **DAÑOS OBSERVADOS**

En las bóvedas cuatrimpartitas estudiadas se aprecian las siguientes disfunciones:

Desconchados en la piedra coincidiendo con los antiguos tensores

En la parte superior de los dos pilares más próximos a la bóveda y en la prolongación horizontal de estos puntos en la fachada principal se han observado los restos de los anclajes de los tensores originales de la bóveda. Se trata de unos pasamanos de hierro embebidos en la piedra y que presentan un estado de corrosión muy avanzado, con exfoliaciones de hierro que afectan a la piedra circundante.

Grietas en las cabezas de apoyo de la bóveda

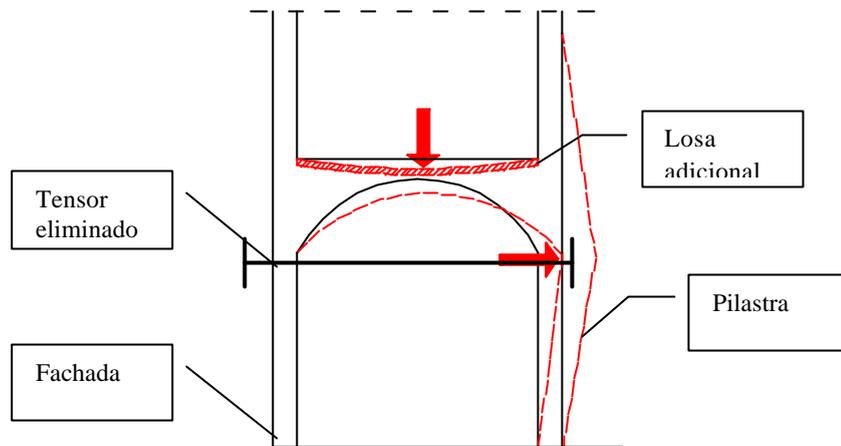
Se detectan grietas verticales en los apoyos centrales de la bóveda en fachada principal y en el pilar enfrente del patio, estando el del pilar adyacente reconstruido anteriormente. Las grietas se encuentran en las piezas de piedra que se empotran en los muros, habiéndose producido deslajamientos parciales en algunos casos.

Falta de verticalidad del pilar del patio

En el vestíbulo central se ha observado un único pilar que no tiene arriostramiento por el patio central, habiéndose observado una falta de verticalidad, desplome, de la parte superior hacia el patio, que está asociado a los empujes horizontales de la bóveda, el desplome actual son 2.67 cm.

La inexistencia de los tensores que inicialmente trababan la bóveda en el sentido transversal conjuntamente con el aumento de cargas encima de la misma ya son causa suficiente para justificar la apertura y la creación de grietas en las zonas mas criticas. Este efecto podría

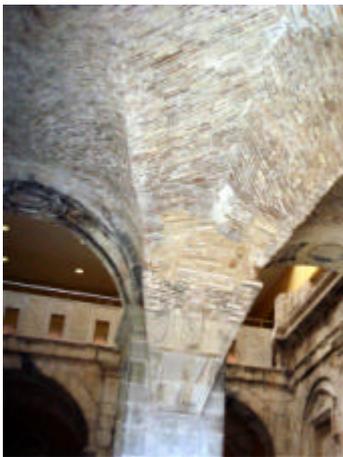
estar relacionado con el evidente desplome del pilar sin arriostramiento por el patio, no pudiéndose descartar con toda seguridad que este desplome, o parte de él, sea de origen.



*Figura 2. Representación gráfica de la deformación de la bóveda y su repercusión en el pilar sin arriostramiento por el patio.*

Grietas en la unión de los pilares y los arcos perimetrales del patio

Se advierten separaciones entre los sillares de cierre en la zona de senos de los arcos de medio punto con los pilares de perímetro del patio. Las grietas marcan la separación de las dos bóvedas contiguas por la zona del pilar. En cuatro de los arcos del patio se han detectado roturas de la piedra angular o de sus adyacentes.



*Foto 2: Vista general del apoyo de las bóvedas cuatrimpartitas en el pilar exento del patio*



*Foto 3: Grieta en el apoyo de la bóveda en el pilar del patio.*



*Foto 4: Desconchados y grietas en el apoyo de bóveda en la fachada principal*

### Daños observados en la bóveda

Se advierten grietas, algunas de ellas ya tratadas en una primera actuación, en la clave de la bóveda y acumuladas en la zona próxima al pilar enfrente del patio, marcando la reparación entre las piezas cerámicas y el mortero. Algunas próximas al pilar son de reciente aparición.

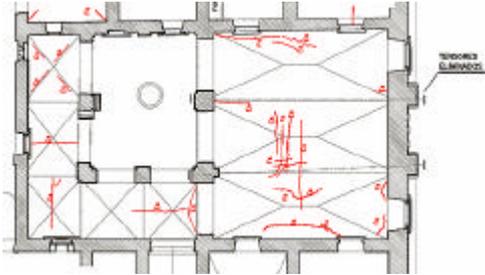
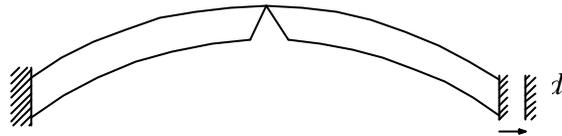


Figura 3. Daños en la bóveda



4: El arco debe agrietarse para acomodarse a un aumento de luz.

Las grietas en el cañón principal de la bóveda frente al pilar, en la zona de la línea de la clave, corresponden a la articulación del esquema de la figura adjunta.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA BÓVEDA

### Modelización

Valorando todos los factores anteriormente descritos se ha procedido a la modelización y análisis de la estructura de la bóveda principal.

Dada la definitiva relevancia de la geometría para el estudio de este tipo de estructuras (bóvedas), se ha procedido a realizar un levantamiento taquimétrico de la zona que posteriormente se ha analizado en el cálculo. Tomando como base de partida las coordenadas obtenidas del levantamiento taquimétrico se genera, mediante el programa Autocad 2002, el modelo en tres dimensiones exportado a través de un archivo DXF para su posterior utilización por el programa de análisis estructural SAP2000. En la figura 5 se observa un gráfico de la modelización final con la que se ha realizado el análisis.

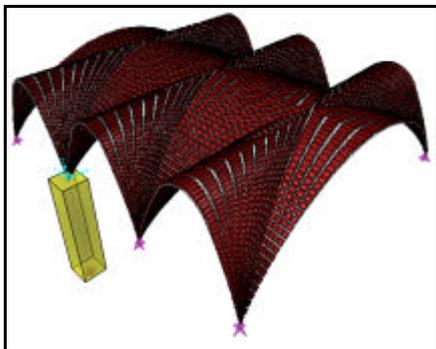


Figura 5: Modelización de la estructura



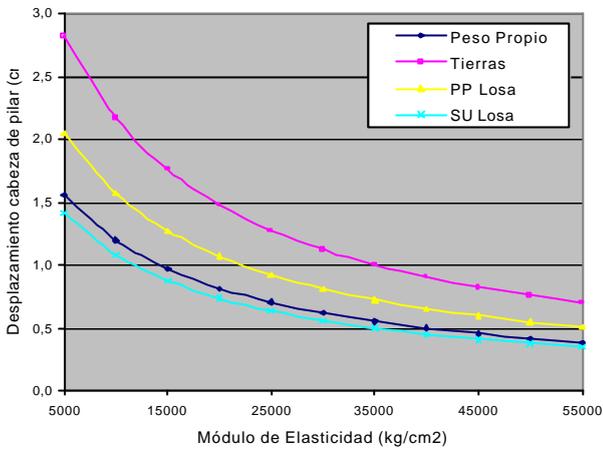


Figura 7: Variación del desplazamiento en cabeza de pilar en función del módulo de Elasticidad del pilar.

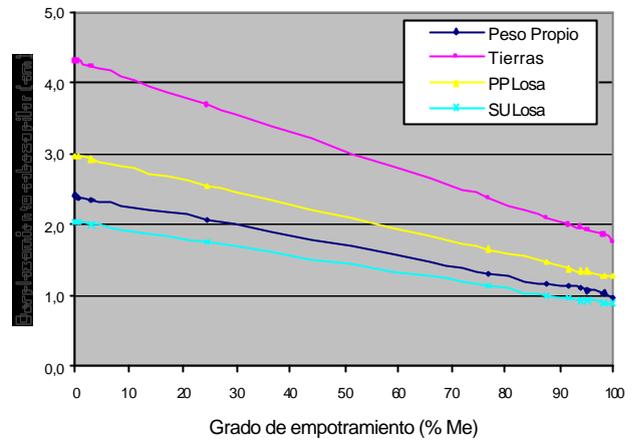


Figura 8: Variación del desplazamiento en cabeza de pilar en función del grado de empotramiento en base del pilar.

El desplazamiento actual del pilar, suma de toda su historia de cargas es de 2.67 cm eso quiere decir que la situación más coherente es considerar un empotramiento casi perfecto en la base del pilar y un grado de empotramiento en la unión bóveda-pilar del 50% considerando un módulo de elasticidad de 15000 kg/cm<sup>2</sup>. Si consideramos un módulo de elasticidad de la fábrica de piedra dos veces mayor, la unión superior (bóveda-pilar) estaría próxima a la articulación, manteniéndose el empotramiento en la base (figura 9).

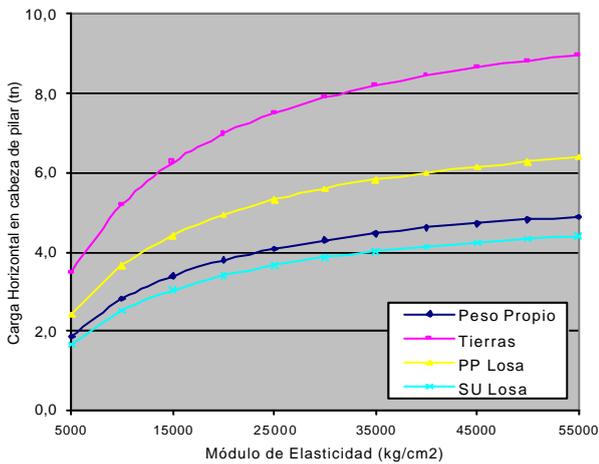


Figura 9: Variación de la carga horizontal en cabeza de pilar en función del módulo de Elasticidad del pilar.

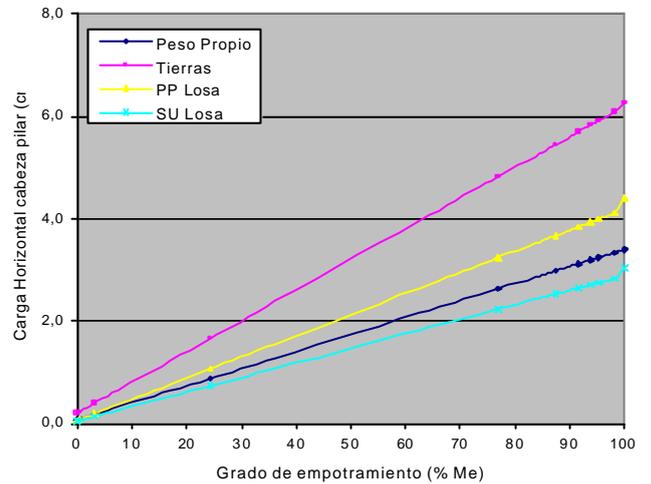


Figura 10: Variación de carga horizontal en cabeza de pilar en función del grado de empotramiento en base del pilar.

Por otra parte la influencia de la losa sobrepuesta es relevante ya que se incrementa solo con el peso propio de la losa un 45% la concarga existente, y el desplazamiento en cabeza.

Si se considera la cabeza del pilar articulada, de empotrar la base a considerarla una articulación los desplazamientos globales se multiplican por 2,4 (ver figura 8) resultando siempre nulos los esfuerzos (momentos). Si se triplica el módulo de elasticidad del modelo, los esfuerzos en la cabeza del pilar aumentan solo un 39% (ver figura 9), y los desplazamientos un 53% (ver figura 7). Si se considera la cabeza del pilar empotrada, de tener la base empotrada a articulada, los desplazamientos globales se multiplican por 2,5 (ver figura 8) y los esfuerzos en cabeza se reducen un 30% (ver figura 10).

Todo lo anterior lleva a la consideración de que si la solución es atirantar la cabeza el dimensionamiento del tirante no es muy sensible al módulo de elasticidad adoptado, ni al modelo de comportamiento, pudiendo dimensionarse para la situación más desfavorable de todas las planteadas, sin que ello suponga un coste adicional significativo.

## **CONCLUSIONES**

- Cuando la caracterización de los materiales (bóvedas de fábrica de ladrillo cocido) y de las condiciones de contorno (grado de empotramiento de los nudos) de las estructuras son difíciles, es importante estudiar la sensibilidad que tienen a su variación los parámetros que nos interesa conocer, como se demuestra en este ejemplo.

- En el caso de las bóvedas cuatrimpartitas con un apoyo sin contrafuerte, se ha podido apreciar con la modelización realizada que, la influencia de la remodelación llevada a cabo colocando una losa por la parte superior, incrementa entre un 43% y un 48% la concarga existente y el desplazamiento en cabeza del pilar sin contrafuerte en función de las variables de partida que se adopten (módulo de elasticidad y grado de empotramiento).

- A efectos de diseñar un tirante que resuelva la falta de contrafuerte en el pilar, la influencia de distintos valores dados al módulo de elasticidad del conjunto, no es significativa ya que en la sección del cable tiene una repercusión baja, el hecho de que los esfuerzos y/o desplazamientos aumenten por ejemplo un 50% cuando el módulo de elasticidad es tres veces menor.

## **BIBLIOGRAFÍA**

[1] de Herrera, J. El esqueleto de piedra. CEHOPU.