

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL CORO ALTO DE LA CATEDRAL DE SANTIAGO DE BILBAO

Amaia Garai Palacio
Jesús Díez Hernández
Unidad de Construcción y Medio Ambiente
Labein. Tecnalia Corporación Tecnológica

La Catedral de Santiago es la construcción de mayor altura e importancia del Casco Viejo de Bilbao. Los trabajos para su levantamiento se iniciaron en 1379 sobre un primitivo templo románico y no finalizaron hasta bien entrado el siglo XV, momento en el que se consagró la edificación al Apóstol Santiago. La Catedral es de estilo gótico y en su interior destacan las generosas bóvedas que cubren las tres naves que forman el conjunto arquitectónico. A mediados del siglo XVI, el edificio sufrió un devastador incendio en el que se quemaron las dos naves laterales, siendo años más tarde reconstruida en estilo gótico tardío.

El coro alto, cuyo análisis estructural es el objeto del presente artículo, fue construido en 1729 a los pies de la nave central.

Durante las recientes obras de restauración del edificio y con motivo de la implantación de un nuevo órgano en el coro alto de la Catedral, fue solicitado al Centro Tecnológico Labein la realización de un estudio que contemplara la evaluación de la estructura del coro y el diseño (si fuera necesario) del refuerzo correspondiente en el caso de que dicha estructura no pudiera hacer frente con seguridad al peso del nuevo órgano.

Las características de la estructura fueron añadiendo complejidad al estudio que finalmente constó de las siguientes fases para su completo desarrollo:



Fig. 1

1. Identificación del esquema del forjado existente.
2. Control dimensional del arco portante del forjado.
3. Determinación de las características mecánicas del material pétreo del arco mediante extracción y ensayo de muestras.
4. Cálculo de solicitaciones en el forjado.
5. Cálculo de solicitaciones en el arco.
6. Diseño de nueva estructura portante de forjado.

En los apartados siguientes se describe la metodología utilizada en cada fase junto con los resultados obtenidos.

1. Identificación del esquema del forjado existente

La identificación del esquema estructural se realizó mediante la apertura de huecos de gran tamaño desde la parte superior e inferior del forjado. Pudo así observarse que se trataba de un forjado relativamente moderno (en ningún modo original) formado por perfiles metálicos de dimensiones similares a un IPN 160 separados

50 cm e independientes entre sí. Estos perfiles apoyaban por un extremo en un perfil asimilable a un IPN 220 embebido en uno de los muros de fachada y por el otro en un arco carpanel de sillería. Entre los perfiles metálicos se encontraron unas bovedillas formadas por ladrillos y recubiertas por su lado inferior con mortero pintado de blanco. Sobre el conjunto existía un entarimado de 2 cm de espesor. Toda la estructura metálica descrita presentaba un avanzado estado de corrosión.

2. Control dimensional del arco portante del forjado

El arco que forma parte de la estructura del coro estudiada es de piedra no exento, que descansa sobre dos pilas de grandes dimensiones. Presenta un alto grado de rebajamiento (relación luz/flecha = 10) y deformaciones visibles en su geometría (Figura 1).

Para realizar el control de las dimensiones del arco y de los elementos que le componen, se utilizaron los siguientes aparatos:

- Medidor de distancias:

Marca: Hilti
 Modelo: PD10 – Láser
 Precisión: +3 mm
 • Nivel automático de precisión:
 Marca: Zeiss
 Modelo: Ni 1
 Exactitud de horizontalización: +0.2"

Con el medidor de distancias se midieron en altura 27 puntos de la parte inferior del arco, uno por cada dovela. Para la corrección de las medidas por la irregularidad del suelo se empleó el nivel automático de precisión.

tensión de rotura un valor de 480 kp/cm². El módulo de elasticidad longitudinal calculado fue de 90.512 kp/cm².

El *testigo 2* rompió con una carga de 7.220 kp, la tensión de rotura en este caso alcanzó los 368 kp/cm². Los módulos de elasticidad longitudinal y transversal calculados son respectivamente 77.090 kp/cm² y 0,21 (Figuras 2 y 3).

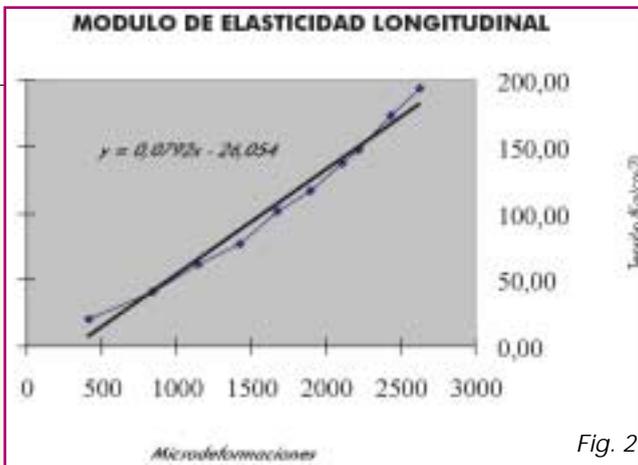


Fig. 2

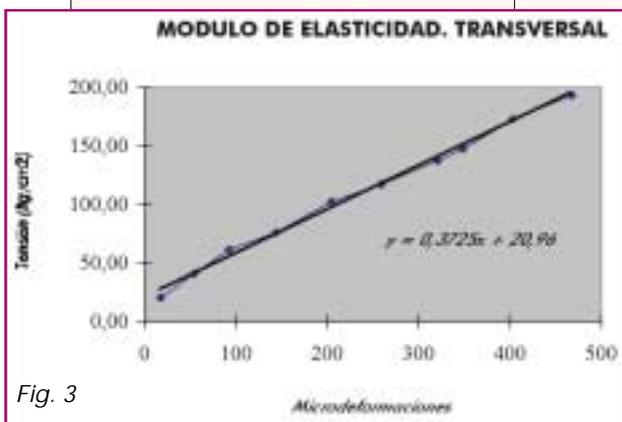


Fig. 3

3. Determinación de las propiedades mecánicas del material pétreo del arco mediante extracción y ensayo de muestras

Con el objeto de caracterizar mecánicamente el material pétreo, se extrajeron dos probetas testigo de 50 mm de diámetro y 125 mm de altura en una zona poco visible del arco. Sobre estas probetas se realizaron los ensayos de rotura a compresión y determinación de los módulos de elasticidad longitudinal (módulo de Young) y transversal (coeficiente de Poisson).

El ensayo se realizó conforme a la Norma ASTM D 3148-80 siendo el equipo utilizado el siguiente:

- Prensa Amsler 1/10
- Puente de extensometría portátil

El *testigo 1* alcanzó la rotura para una carga de compresión de 9.424 kp, alcanzando la

4. Cálculo de solicitaciones en el forjado

Dadas las características del forjado, se realizó un sencillo cálculo estructural, comprobando únicamente el perfil más cargado (el central), considerando una viga de un único vano biapoyado con una luz de 5 metros.

Por semejanza del perfil existente a un IPN 160, se asumieron los siguientes datos de su sección:

- Superficie = 22,8 cm²
- Inercia = 935 cm⁴
- Peso = 17,90 kp/m

Aparte del peso propio, se consideró una sobrecarga de 200 kp/m² y las cargas del nuevo órgano (Fig. 4). Para realizar el reparto de cargas sobre los perfiles, se asignó una superficie de 0,5 metros de anchura por la longitud de la viga, 5 metros. Los co-

eficientes de mayoración de cargas utilizados fueron de 1,33 para las acciones de peso propio y de 1,5 para las de sobrecarga y peso del órgano.

Los resultados del cálculo fueron los siguientes:

- Momento máximo = 1.617 kp*m
- $\sigma_{max} = 1.381 \text{ kp/cm}^2$
- Cortante máximo = 1.242 kp
- $\tau_{max} = 158 \text{ kp/cm}^2$
- Flecha máxima = 2,7 cm

La comprobación de la sección se realizó aplicando el artículo 3.4.3.5 de la Norma NBE EA-95 (Estructuras de acero en la edificación) en el que se da la siguiente fórmula que debe verificarse en todo punto de la sección:

$$-(\sigma^2_{max} + 3 \tau^2_{max}) \leq \sigma_u$$

$$-(1.381^2 + 3 * 158^2) = 1.408 \leq 2.000$$

Suponiendo un acero A-34 cuyo límite elástico ronda los 2.000 kp/cm², se obtuvo que la sección podría soportar los esfuerzos con un coeficiente de seguridad igual a 1,4 (2.000/1.408).

Pese a que los cálculos del forjado fueron satisfactorios (ya que se supone que la estructura aguanta con un coeficiente de seguridad aceptable) lo cierto es que el estado de conservación observado en alguno de los perfiles así como en sus uniones no permitía la colocación del órgano sin una rehabilitación del mismo.

5. Cálculo de solicitaciones en el arco

Se procedió al estudio del comportamiento del arco mediante un análisis por el Método de los elementos finitos utilizando el programa comercial ANSYS (v5.5).

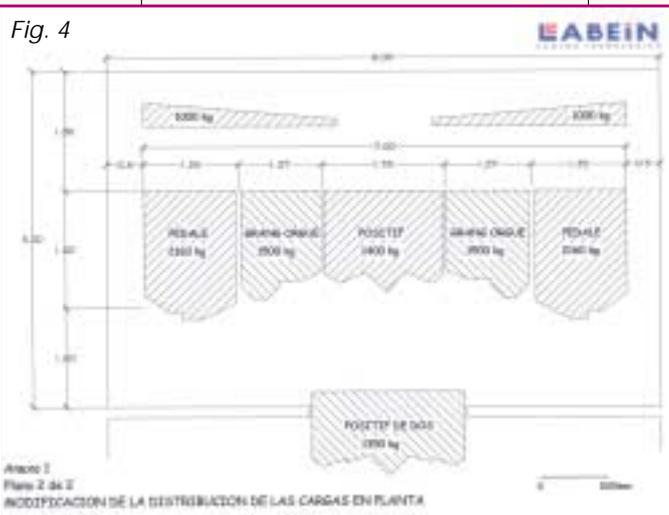
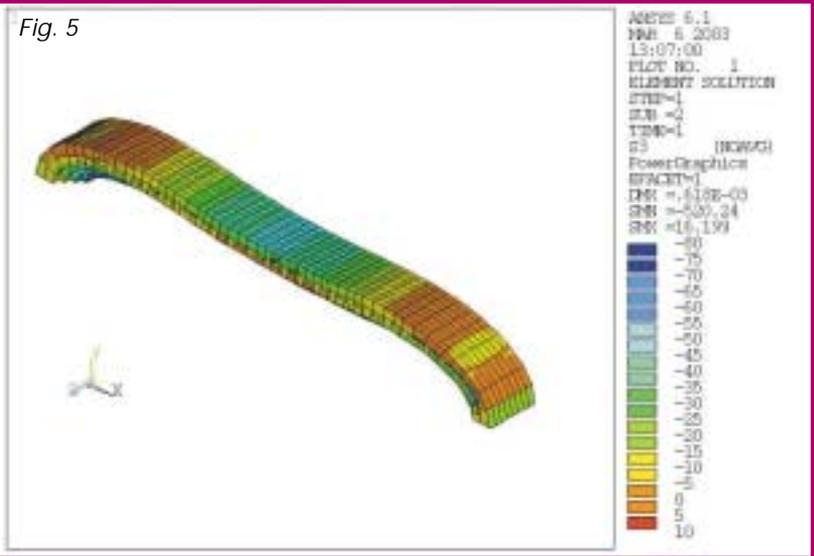


Fig. 4

Fig. 5



El modelo de material (no lineal) utilizado fue el elastofrágil a tracción y elastoplástico a compresión. Para ello, se tomó un tipo de elemento tipo *Concrete* de ANSYS (Solid65), que permitió llegar a conclusiones suficientemente realistas. No se pretendió con la modelización evaluar los niveles tensionales o deformacionales exactos, sino reproducir el mecanismo de fallo de la estructura ante las cargas previsibles.

Las propiedades del material finalmente adoptadas fueron las siguientes:

$E = 770900 \text{ t/m}^2$ (Módulo de Young)

$\sigma_c = 3680 \text{ t/m}^2$ (Resistencia a compresión simple)

$\sigma_t = 50 \text{ t/m}^2$ (Resistencia a tracción simple)

$\nu = 0,21$ (Coef. de Poisson)

Las cargas consideradas fueron las siguientes:

- Peso propio de arco y barandilla superior.

- Reacciones del forjado existente apoyando sobre el arco. Se consideró un valor del peso propio del mismo de 170 kp/m^2 , una sobrecarga de uso de 200 kp/m^2 y la distribución de cargas del órgano reflejada en la figura 5.

Los resultados del cálculo efectuados con estas premisas no fueron positivos. Como puede apreciarse en el gráfico de la figura 6, en dos zonas del centro del intradós del arco y en ambos extremos del trasdós se producen tracciones del orden de las 5 t/m^2 que, pese a ser un valor bajo, en un material frágil como es la piedra, no son admisibles.

En la gráfica de la figura 6 se puede ver el estado de fisuración del arco ante las cargas, que revelan su mecanismo de fallo, la formación de una gran rótula plástica en el centro del arco, y de dos de menor magnitud en los extremos del arco en la parte del trasdós del mismo.

El análisis realizado al arco por medio del Método de elementos finitos (sin pretender dar un valor exacto) aporta una idea muy aproximada del mecanismo de fallo del arco ante las cargas consideradas. Conforme al análisis realizado, se concluyó que no podía garantizarse el comportamiento del arco ante las cargas del nuevo órgano. No es descabellado pensar que podría haber colapsado la estructura tras la colocación del órgano.

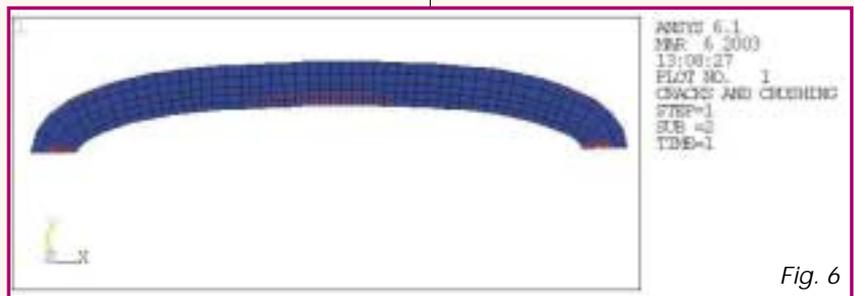


Fig. 6

Llegados a este punto, únicamente cabía la recomendación de la demolición del forjado existente y la construcción de una nueva estructura metálica que soportara íntegramente las cargas sin transmitir ningún tipo de esfuerzos al arco.

6. Diseño de nueva estructura portante de forjado

El diseño de la nueva estructura portante se realizó considerando las siguientes cargas:

- Peso propio de los perfiles metálicos componentes de la estructura.
- Peso de la capa de hormigón prevista y del entarimado. Dado que no se encontraban completamente definidos sus espesores en el momento del diseño, se estimó una carga de 100 kp/m^2 .
- Sobrecarga de uso de 200 kp/m^2 .
- Peso del órgano.

La barandilla de piedra se consideró que seguiría soportada por el arco, con lo cual no interfiere en el dimensionamiento de la estructura portante.

En un primera aproximación se consideró que el forjado sería soportado por cuatro vigas biapoyadas, sobre dos laterales que las recogen, las cuales habrán de soportar los pesos propios de los elementos, la sobrecarga de uso y la acción transmitida por el órgano. Se realizó la comprobación de los elementos a resistencia y a deformabilidad, imponiendo una limitación por flecha de $l/500$.

La estructura diseñada y finalmente ejecutada la compuso un emparrillado plano simétrico apoyado en cuatro puntos, dos en sendos pilares (HEB 300) y otros dos en el muro mediante una ménsula.

La estructura metálica ha quedado oculta tras láminas de madera y soporta sin problemas el peso del nuevo órgano. Asimismo, mediante

esta intervención se ha liberado al arco de la carga del forjado antiguo, mejorando su comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Cultura de la Diputación Foral de Bizkaia y al Obispado de Bilbao la financiación del estudio expuesto, así como la autorización por parte de estos Organismos, para la publicación del presente artículo. ■