



## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ACÚSTICO EN IGLESIAS: CASOS PRÁCTICOS

J. J. Sendra<sup>§</sup>, T. Zamarreño\*, J. Navarro<sup>§</sup> y J. Algaba\*.

\* Departamento de Física Aplicada.

§ Departamento de Construcciones Arquitectónicas I,  
Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Avda. Reina Mercedes 2. Universidad de Sevilla 41012,  
Sevilla, España.  
Tel. 954556612. Fax. 954556534.  
E-mail: [teofilo@cica.es](mailto:teofilo@cica.es)

### SUMMARY

In this paper the authors are continuing their research line on acoustical behavior in churches. It contains a brief summary of the methodology applied to churches, with their particularities, and three representative applications to other recently rehabilitated churches are presented: the church of the "Hospital de las Cinco Llagas", the church of "S. Francisco de Baeza (Jaén)" and the church of "Carmen de Vélez Málaga (Málaga)".

### INTRODUCCIÓN

Con este texto se pretende recoger y presentar parte de los contenidos de dos cursos de doctorado que impartimos en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, referidos al problema de la corrección acústica de iglesias y orientados fundamentalmente para arquitectos.

Los autores del trabajo formamos el núcleo principal de un grupo de investigación, integrado por físicos y arquitectos, que constituyen el equipo que, desde el año 1988, asesora a la Junta de Andalucía en acústica para su ambicioso Plan de Rehabilitación de Teatros. Además de nuestros trabajos en el campo de la acústica arquitectónica teatral, hemos intervenido muy frecuentemente en proyectos de rehabilitación de espacios eclesiales, principalmente destinados a usos culturales, en los que, con buen criterio, se ha querido abordar el problema de la calidad sonora en su interior, aspecto éste que, en general, resulta difícil de conseguir. De hecho, son numerosos los ejemplos de fracasos funcionales en los proyectos de rehabilitación de iglesias, precisamente por las deficientes condiciones acústicas. Por ello, hemos elaborado una metodología de análisis, adaptada a la casuística general de las iglesias, que entendemos puede ser de interés para abordar problemas acústicos en la rehabilitación de estos espacios. Como muestra de su aplicación, presentamos tres ejemplos de iglesias rehabilitadas, en las que hemos intervenido.

### METODOLOGÍA

Resumimos a continuación la metodología de análisis<sup>1</sup>, que se estructura fundamentalmente sobre los siguientes cuatro aspectos:

1. Tiempo de reverberación. La reverberación ha sido considerada por la mayoría de los estudiosos en temas de acústica arquitectónica como el principal problema a resolver por la acústica interna, pues es quizá, de todas las propiedades, la que mejor caracteriza, de forma global, la calidad acústica de un recinto cerrado. La fórmula de Sabine para calcular el tiempo de reverberación sigue teniendo validez general en su aplicación a los espacios eclesiales, ya que sus resultados, en la predicción, resultan adecuados normalmente. Sin embargo, es preciso introducir dos matizaciones: la primera es la modificación que en las grandes iglesias introduce la absorción del aire y la segunda, el comportamiento como espacios acoplados de algunas capillas laterales o estructuras espaciales complejas, frecuentes en muchas iglesias. La aplicación práctica de este apartado suele realizarse con apoyo de programas informáticos, que simplifican laboriosos procesos de cálculo

2. Inteligibilidad. Se entiende con ello la capacidad de entender un mensaje hablado, emitido por un locutor, a través de un determinado canal de transmisión, por ejemplo, una sala o una iglesia. La posibilidad de identificar al orador a través de su voz queda, pues, excluido del significado dado a este término. La inteligibilidad de la palabra en una iglesia, como en cualquier sala, depende de muy diversos factores: niveles y espectro de emisión, niveles y espectro del ruido de fondo, reverberación del recinto, claridad en la pronunciación del orador, familiaridad que el oyente tenga sobre el discurso, etc. Como puede intuirse, dados los altos tiempos de reverberación en las grandes iglesias, y las distancias orador-oyente (lo que implica bajas relaciones señal/ruido), se suelen obtener resultados muy pobres en los índices que miden esta inteligibilidad, cuestión ésta que, reconocida históricamente, da lugar a la aparición de medidas correctoras, como el uso del púlpito y su colocación próxima a los fieles. La predicción de la inteligibilidad suele hacerse a través de modelos informáticos relacionados con el cálculo de la reverberación. No obstante, en nuestra opinión, basada en la experiencia en el uso de diferentes modelos, todavía tienen un margen de error demasiado amplio.

3. Distribución sonora. La distribución sonora en una iglesia permite detectar el grado de difusión sonora, así como la ubicación de las zonas de máxima concentración y máxima caída de nivel acústico, lo que ayuda a establecer el grado de uniformidad del campo sonoro en la sala. A partir de estas consideraciones, es posible valorar la importancia de la geometría del local y de los acabados que se adoptan. Intervienen aquí aspectos del mayor interés, referentes al comportamiento del campo sonoro (directo o reverberado) para los distintos puntos de la sala. En este sentido, nuestro grupo ha podido establecer adaptaciones de las expresiones de Barron y Lee al caso particular de algunos tipos eclesiales, como el mudéjar sevillano, cuyos resultados hemos expuesto ya en otras publicaciones. Otro aspecto que ayuda al análisis de la distribución sonora lo constituye la acústica gráfica, que por su propia naturaleza resulta de gran afinidad para los arquitectos. En el proceso de elección y determinación de la forma arquitectónica, puede resultar de gran provecho y sencillez la aplicación de los métodos gráficos propios de la acústica geométrica. Una primera aplicación sería la detección de las zonas donde se producen fenómenos de concentración de energía sonora y la influencia en ellos de la existencia de superficies cóncavas y convexas. Una segunda utilidad sería el control en la formación de ecos.

4. Ruido de fondo. El control del ruido en el interior de las iglesias es uno de los aspectos más importantes a la hora de su rehabilitación. Para su estudio conviene tener presentes los tres elementos básicos que intervienen: la fuente de ruido, el canal de transmisión y el receptor. Los procedimientos que se siguen para lograr el aislamiento acústico pretenden reducir los efectos de la transmisión de ondas sonoras desde el emisor hasta el local receptor. Dadas las características constructivas y tipológicas de la mayoría de las iglesias, el problema del ruido de fondo proveniente del exterior es de muy escasa envergadura. Sólo en iglesias de disposición urbana muy céntrica, en cuyas proximidades se ha producido un notable incremento del tráfico rodado, podemos encontrar con algún problema serio. El punto más débil en este sentido son las puertas de la iglesia y éstas suelen disponer de cancel, lo que limita la penetración del ruido de fondo. Sin embargo, en iglesias de gran volumen, con tiempos de reverberación altos, el problema del ruido de fondo de origen interior sí suele constituir un factor negativo añadido a su conducta acústica.

#### **ALGUNAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN.**

Mostramos a continuación tres ejemplos de iglesias rehabilitadas en los que hemos intervenido y en cuyo proyecto se han tenido en cuenta los aspectos acústicos:

##### **1. Iglesia del Hospital de las Cinco Llagas de Sevilla.**

Una de las intervenciones de rehabilitación más importantes llevadas a cabo en los últimos tiempos en Andalucía, aún hoy sin culminar, ha sido la del antiguo Hospital de las Cinco Llagas de Sevilla como sede del Parlamento Andaluz. El edificio, obra de Hernán Ruiz, es un magnífico ejemplo de arquitectura renacentista. La planta de la iglesia es de cruz latina, con pequeñas capillas laterales. Se cubre con bóvedas de cantería que descargan sobre muros y pilastras del mismo material. Tiene un volumen aproximado de 12000 m<sup>3</sup>, con una altura media de 20 m, una superficie interior de 6000 m<sup>2</sup>, de los que 450 m<sup>2</sup> corresponden a la planta útil. La ocupación prevista es de 300 personas. Todo ello proporciona: un volumen por plaza de 40 m<sup>3</sup> (frente a los

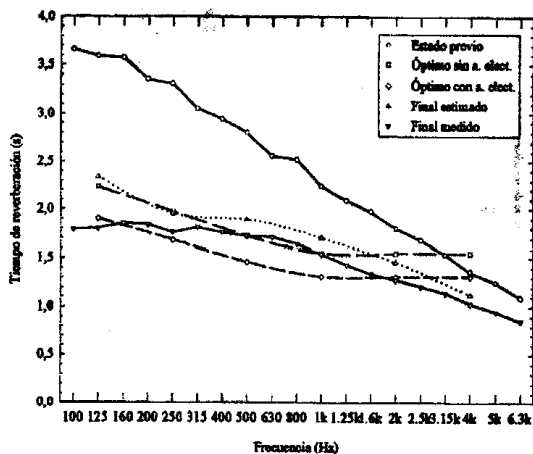


Fig. 1.-  $T_R$  en la iglesia del Hospital de Las Cinco Llagas.

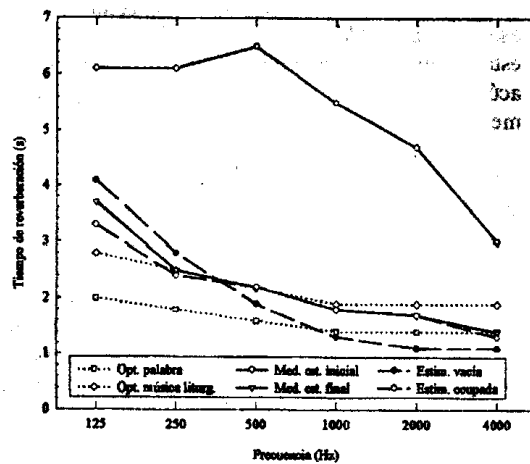


Fig. 2.-  $T_R$  en la iglesia del Convento de S. Francisco.

cuatro o cinco recomendables, según el uso); una razón volumen/área en planta de 26 m (frente a los 8 deseables) y una densidad de ocupación baja, pero no desproporcionada, de 1'5 m<sup>3</sup>/persona. El proyecto de rehabilitación ha sido elaborado por los arquitectos A. Jiménez y P. Rodríguez. Nuestro grupo ha intervenido en estrecha colaboración con ellos, ya desde la fase de anteproyecto, lo que ha permitido conjugar decisiones formales y funcionales con las exigencias de acondicionamiento acústico.

Las condiciones acústicas del estado inicial fueron exhaustivamente analizadas, partiendo de una completa medición. De sus resultados fueron extraídas las siguientes conclusiones:

- Los tiempos de reverberación eran muy elevados y, al ser inamovible el valor del volumen de la sala por razones obvias, la única opción era aumentar la absorción. Hubo de acudir al diseño de paneles perforados del tipo resonadores de Helmholtz acoplados. Para ampliar la banda de absorción a bajas frecuencias, se combinaron paneles perforados y sin perforar, con distintas densidades de perforación y diámetros de las perforaciones, para situar las frecuencias de resonancia en el rango 125- 400 Hz. Para aumentar la absorción a frecuencias medias, se trasdosaron unos paneles con manta de lana mineral de 5 cm de espesor, dejando una cámara de aire de 25 cm. Además el suelo original de mármol se recubrió con una gruesa moqueta. Sobre el retablo se colgó un tapiz de gran tamaño.

- Las zonas de colocación de los paneles absorbentes fueron determinadas mediante el uso de la acústica gráfica, con la ayuda de modelos informáticos.

- La incidencia de los niveles de ruido de fondo no era significativa. De todos modos se recomendó la inclusión de un doble cancel en cada puerta de acceso, así como diseñar el sistema de climatización con muy baja velocidad de impulsión y con las necesarias cámaras de *plenum*, para evitar la producción de ruidos.

- La inteligibilidad de las zonas alejadas era baja, por lo que las medidas tendentes a disminuir la reverberación y el ruido de fondo constituían también las vías de mejora de este parámetro. Igualmente se propuso un sistema electroacústico muy distribuido y direccional.

Los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios. Como muestra representativa, se acompaña la gráfica de modificación de los tiempos de reverberación. Así pues, a pesar de que la forma y dimensiones del espacio original no son las más recomendables, desde el punto de vista acústico, para el uso que se pretende dar al recinto, la coordinación entre nuestro equipo y el equipo redactor del proyecto ha facilitado la toma de decisiones y nos ha permitido cumplir con los objetivos propuestos. El resultado es que el recinto está actualmente en uso de un modo plenamente satisfactorio.

## 2. Iglesia del Convento de S. Francisco de Baeza (Jaén).

Esta importante iglesia renacentista, atribuida a Andrés de Vandelvira, se encontraba en estado de ruina tras la guerra civil española y así permaneció hasta los año 80, cuando fue rehabilitada como sala cultural, principalmente para conferencias y conciertos. Esta rehabilitación fue acometida sin incorporar criterios acústicos, por lo que, una vez inaugurada, quedaron de manifiesto los altísimos tiempos de reverberación, incluso con formación de ecos, distribución sonora inapropiada y alto ruido de fondo por la utilización de muros-cortina simples con insuficiente aislamiento acústico.

A iniciativa del gobierno regional se redactó un proyecto de acondicionamiento acústico que contó con nuestro asesoramiento. Al igual que en el caso anterior, pudo establecerse un pormenorizado estudio de las condiciones acústicas de partida, del que se dedujeron las siguientes medidas para la corrección.

- Introducción de butacas para el público, con respaldos y asientos fuertemente acolchados, en sustitución de las gradas de piedra y madera existentes.

- Colocación de toldos extensibles motorizados que, de manera temporal, pueden cubrir la iglesia a la altura de cornisa. Esta medida, además de corregir el tiempo de reverberación a algunas frecuencias, tiene una influencia positiva sobre la distribución sonora, al evitar la acción de las bóvedas.

- Separación mediante un cortinaje, pesado y móvil, del volumen del coro del resto del volumen del auditorio. Esta medida, junto con la anterior, conforma un espacio de sala interno al propio espacio inicial, que contribuye a eliminar las reflexiones largas y los ecos, proporcionando intimidad y mejorando la inteligibilidad.

- Colocación de un plano de tejido absorbente delante de la enorme cristalera situada en el crucero, detrás de lo que sería la escena, separada unos 80 cm de dicha cristalera.

Se acompaña una gráfica con la modificación de los tiempos de reverberación. A pesar de que las condiciones de partida resultaban difíciles, tanto por las condiciones acústicas de la iglesia, como por la naturaleza de las medidas correctoras posibles en una obra que había finalizado recientemente su rehabilitación, los resultados obtenidos muestran la idoneidad de las soluciones propuestas, aunque hubiese sido deseable complementarlas con otras que, aunque sugeridas, no fueron ejecutadas. De todos modos, la sala queda preparada para albergar con dignidad las distintas actividades culturales asignados.

### 3. Iglesia del Carmen de Velez- Málaga (Málaga).

El actual Teatro del Carmen de Velez-Málaga es el resultado de una reciente obra de rehabilitación y adaptación realizada por la Junta de Andalucía, con un proyecto elaborado por A. González Cordon, contando con nuestro asesoramiento. El nuevo uso principal de la sala es el teatral. Esta iglesia de planta barroca, perteneciente al desamortizado Convento del Carmen, se encontraba en avanzado estado de ruina por la que la medición *in situ* no fue posible realizarla y hubo que trabajar sobre un análisis teórico del proyecto.

Evidentemente, la sala original, estrecha y larga, con más de 15 m de altura, era una sala inadecuada para lograr unas buenas condiciones acústicas. Por otra parte, y por motivos diversos, el arquitecto planteaba como línea de trabajo la recuperación del espacio interior eclesial. Tras el análisis del modelo teórico, fueron obtenidas las siguientes conclusiones:

- Se conforma un espacio de sala dentro del propio espacio eclesial, disponiendo una gran superficie de cortinajes de terciopelo desplegados pesados y fruncidos.

- La sala se cierra por uno de sus laterales mediante un muro-cortina de vidrio con luna exterior de (6+12+3+3) mm y vidrio templado de 10 mm en el interior, lo que contribuye al aislamiento acústico.

- Se mantiene la forma de cubrir la nave mediante bóveda, pero se ejecuta mediante una estructura de madera laminada, con un doble tablero dispuesto sobre rastreles con lana de roca, aislando tanto térmica como acústicamente.

Como resumen de los resultados obtenidos, presentamos la gráfica con la modificación de los tiempos de reverberación. Se puede observar que la predicción hecha sobre el anteproyecto resultó más favorable, ya que se había contemplado una mayor superficie de cortinajes de la que luego se dispuso.

### REFERENCIAS

J.J. Sendra, T. Zamarréño, J. Navarro y J. Algaba "El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación" Inst. Universit. Ciencias Construc. Universidad de Sevilla (1997).

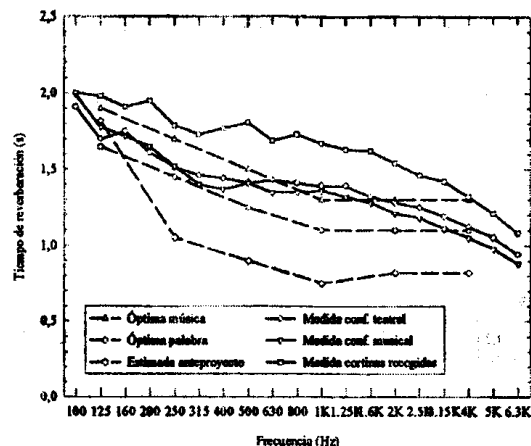


Fig. 3.-  $T_R$  en la iglesia del Carmen de Vélez Málaga.