



## REHABILITACIÓN DE UN ESPACIO ECLESIAL COMO ESPACIO ESCÉNICO

PACS: 43.55.Fw, 43.55.Ka

Muñoz Muñoz, S.; Zamarreño García, T.; Sendra Salas, J.J.; Navarro Casas, J.  
Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (I.U.C.C.).  
Universidad de Sevilla.  
ETS de Arquitectura de Sevilla.  
Av. Reina Mercedes, 2. 41012 Sevilla.  
Tel: 95 455 66 12  
Fax: 95 4 55 78 92  
E-mail: munoz@us.es

### ABSTRACT

Each time more frequently, we found examples of antique religious spaces, in advanced conditions of deterioration and forlornness, which the only way to preserve is giving them different uses of what they were designed for. It is obvious, therefore, to think that the acoustic conditions of these spaces are not the most adequate for its new use and they need to be adapted.

With this purpose is designed the Rehabilitation and Adaptation Project of the Church of the Compañía de Jesus Convent in Jerez de la Frontera (Cadiz), which is financed by the Gerencia Municipal de Urbanismo. They ask us to develop the acoustic study of the building and the proposal of the corrective actions for its new use. Here there are the more relevant aspects of this study.

### RESUMEN

Cada vez con más frecuencia nos encontramos con ejemplos de antiguos espacios eclesiales, en avanzado estado de deterioro y abandono, cuya única salida para su conservación es la de albergar usos diferentes para los que fueron concebidos. Es obvio, por tanto, pensar que el comportamiento acústico de dichos espacios no será el más adecuado para las nuevas funciones, probablemente tampoco lo eran para las anteriores, siendo necesario ejecutar algún tipo de actuación que permita conseguir unas condiciones acústicas acordes con el nuevo uso planteado.

En este marco se inscribe el proyecto para la rehabilitación y adecuación como espacio escénico de la Iglesia del Antiguo Convento de la Compañía de Jesús en Jerez de la Frontera (Cádiz), financiado por la Gerencia Municipal de Urbanismo, la cual nos planteó desarrollar el estudio acústico del edificio, así como la propuesta de medidas correctoras, para su adecuado comportamiento. Se muestran aquí los aspectos más relevantes de dicho estudio.

### 1. INTRODUCCIÓN

Entre un espacio eclesial y uno escénico podemos encontrar similitudes, principalmente, en dos aspectos. Por una parte, ambos espacios tienen una funcionalidad parecida, que no es otra que la de congregar un público para asistir a una actividad en la que la comunicación, musical

o hablada, desempeña un papel primordial. Por otro lado, sus características espaciales son similares, ya que ambos presentan un espacio de grandes dimensiones, delimitado por muros, y dentro del cual se ubica la audiencia, orientada hacia un atrio o escenario, que se debe de conformar como un lugar acústicamente idóneo para realizar este tipo de actividades.

Presentaremos aquí el proyecto acústico para la reutilización del espacio eclesial de la Iglesia del Antiguo Convento de la Compañía de Jesús, en Jerez de la Frontera (Cádiz), como espacio escénico de uso multifuncional que nuestro equipo ha realizado.

Los espacios eclesiales de geometrías similares al que nos ocupa, se caracterizan por unas relaciones, número de plazas y volumen entre área de audiencia, elevadas y el uso de materiales de revestimiento acústicamente reflectantes. Justamente, esas dos características, gran volumen y materiales poco absorbentes, tienen como consecuencia un tiempo de reverberación excesivamente largo y, en consecuencia, una deficiente inteligibilidad. Es por ello que para la corrección acústica se han adoptado cuatro actuaciones fundamentales: la primera supone una reducción del volumen, al separar del volumen principal las naves laterales, que se dedicarán a usos expositivos, la segunda pretende aumentar de forma significativa la absorción sonora mediante el uso de soluciones constructivas formalmente acordes al espacio a rehabilitar, la tercera implica incrementar las reflexiones difusas adoptando geometrías que eliminen el efecto de grandes planos reflectantes y, finalmente, la cuarta, pendiente de solución concreta, pretende rediseñar el espacio de la escena con el fin de facilitar reflexiones tempranas hacia la audiencia mediante el diseño de un gran tornavoz.

Para realizar el estudio del comportamiento acústico del edificio, en primer lugar, realizamos una medida "in situ" del tiempo de reverberación, siguiendo los requisitos prescritos por la norma UNE-EN ISO 3382:2001<sup>1</sup>. A partir de los resultados de estas medidas, utilizando la ecuación de Sabine, predimensionamos las soluciones a adoptar. A continuación realizamos un modelo del espacio escénico propuesto, con el programa informático de simulación CATT-Acoustic<sup>2</sup>, utilizando la documentación gráfica facilitada por los arquitectos redactores del proyecto (figs. 1, 2 y 3) y utilizando las medidas del estado inicial e intermedio para ajustar las propiedades acústicas de los cerramientos.

## 2. RESULTADOS DE LA MEDIDA INICIAL

El tiempo de reverberación se ha medido, utilizando señales de secuencias de máxima longitud, mediante el analizador MLSSA, colocando el micrófono en los puntos señalados en la fig. 3. Los resultados, promediados espacialmente para las distintas bandas de octava, aparecen en la fig. 4.

Estos valores nos han permitido evaluar el coeficiente de absorción promedio de las superficies interiores mediante la ecuación de Sabine, considerando un volumen estimado total de 4110 m<sup>3</sup>

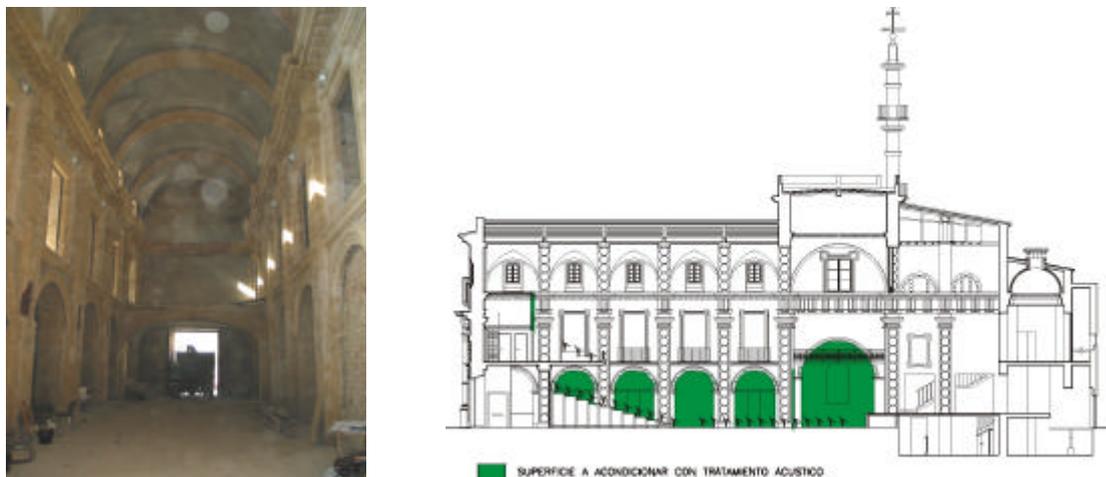


Figura 1. Vista interior del estado inicial y sección longitudinal con indicación de superficies a tratar.

y una superficie interior de 3456 m<sup>2</sup>.

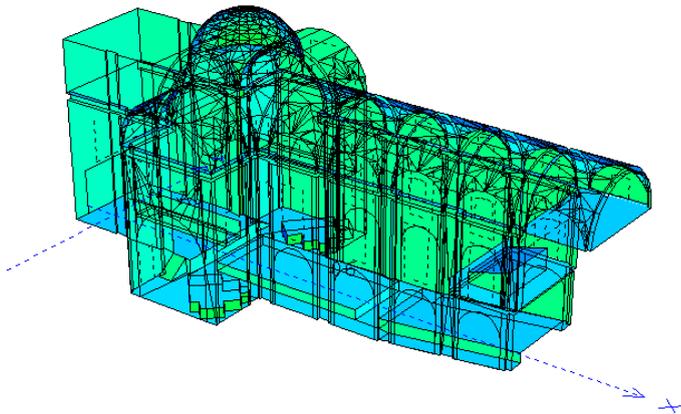


Figura 2. Modelo informático para la simulación

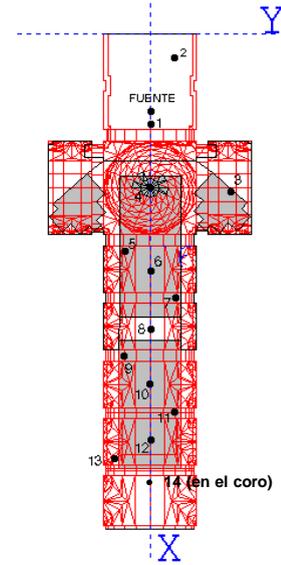


Figura 3. Ubicación de receptores sobre la superficie de audiencia.

Para evaluar las características del tratamiento necesario, se ha calculado el tiempo de reverberación óptimo, para el espacio escénico, en función del uso y del volumen del mismo. Como se pretende un uso polifuncional (tanto palabra como música), hemos manejado los valores recomendados por L. Cremer<sup>3</sup>, que para frecuencias medias (500 Hz) son:

$$\text{OPERA} \begin{cases} T_R^{\max} = 0.509 \cdot V^{0.1335} = 1.55 \text{ s} \\ T_R^{\min} = 0.396 \cdot V^{0.1273} = 1.14 \text{ s} \end{cases} \quad \text{PALABRA} \begin{cases} T_R^{\max} = 0.368 \cdot V^{0.1505} = 1.29 \text{ s} \\ T_R^{\min} = 0.264 \cdot V^{0.1394} = 0.84 \text{ s} \end{cases}$$

Los valores obtenidos a partir de las expresiones anteriores nos permiten obtener los recomendados en las demás bandas de octava, que se muestran en la fig. 4. En ella podemos observar que los tiempos de reverberación medidos son excesivamente altos, por lo que se hace necesario incrementar notablemente la absorción a todas las frecuencias y, si es posible, reducir el volumen como ya hemos indicado.

### 3. EVALUACIÓN INICIAL DEL TRATAMIENTO ACÚSTICO

A partir de los valores de  $T_R^{OP}$ , mediante la ecuación de Sabine, obtenemos la absorción necesaria en la sala  $A_{OP}$  para el nuevo volumen. A partir de los datos de los coeficientes de absorción de las butacas  $\alpha_{BUT}$ , facilitados por el fabricante, se ha estimado la absorción aportada por

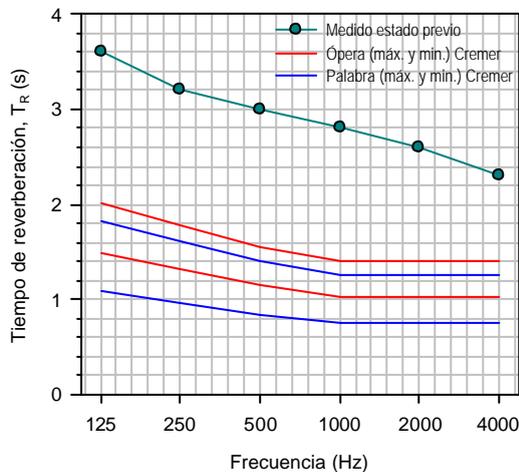


Figura 4.  $T_R$  en el estado inicial y valores recomendados.

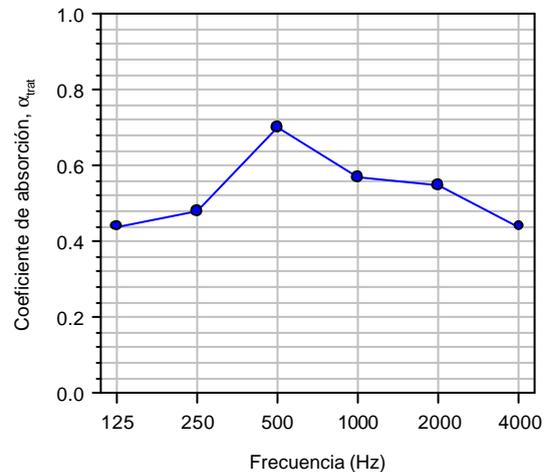


Figura 5. Valores de  $\alpha$  deseables de la superficie a tratar.

la audiencia  $A_{BUT}$ .

En vista de los resultados, y de acuerdo con los criterios de la dirección facultativa, se decide tratar las siguientes áreas (marcadas en verde en la fig. 1) con materiales acústicos: zonas laterales del crucero bajo la primera cornisa, zonas del crucero frente al escenario y bajo la pasarela y arcos de la nave central, incluso los que van a ser practicables, como puertas de comunicación entre espacios.

Con estos valores, podemos deducir la absorción que han de aportar las superficies a tratar  $A_{TRAT}$  para llegar hasta los valores de absorción óptima  $A_{OP}$ . Conocida la absorción que es necesario alcanzar y la superficie disponible para su ubicación, podemos determinar el valor del coeficiente medio de absorción de la superficie tratada  $\alpha_{TRAT}$ .

Al ser complicado encontrar en el mercado un material cuyo coeficiente de absorción muestre un comportamiento frente a la frecuencia como el deseado (fig. 5), se opta por intentar aproximarse a él combinando diferentes tipos de paneles resonantes perforados/ranurados y lisos, sintonizados a diferentes frecuencias, con un material absorbente acústico en el interior de la cámara de aire, que ofrezca a la vez un acabado acorde con los criterios de la dirección facultativa.

#### 4. SIMULACIÓN INFORMÁTICA

Realizado el predimensionado de los tratamientos, hemos elaborado un detallado modelo informático (consta de más de 1700 vértices y más de 1500 planos) para tratar de predecir el comportamiento acústico del recinto una vez reformado (figs. 2 y 3). Se han ejecutado dos versiones del modelo: una para el espacio vacío y otra con la audiencia presente. En la simulación se han considerado las reflexiones hasta el sexto orden.

Tuvimos la oportunidad de realizar una medida en un estado intermedio, después de delimitar el volumen pero antes de aplicar los tratamientos superficiales diseñados; si bien la zona de audiencia se encontraba ocupada por mesas con manteles y sillas que aportaban parte de la futura absorción de las butacas (fig. 6). Los valores de  $T_{R20}$ , que se muestran en la fig. 7, nos sirvieron para calibrar el modelo informático. En la misma figura se muestran los resultados de la simulación, tanto vacío como lleno, y las bandas recomendadas. Podemos observar que, tras la reforma, los valores de  $T_R$  se sitúan, según los resultados de la simulación, en la parte alta de la banda recomendada; lo que teniendo en cuenta la tipología y proporciones del recinto, es altamente satisfactorio.

El espectro del ruido de fondo medido en el estado intermedio se muestra en la fig. 8 superpuesto sobre las curvas de valoración NC. Este espectro se utilizó, como datos de entrada, para la simulación, dato importante al valorar la inteligibilidad mediante el índice RASTI.



Figura 6. Vista interior estado intermedio.

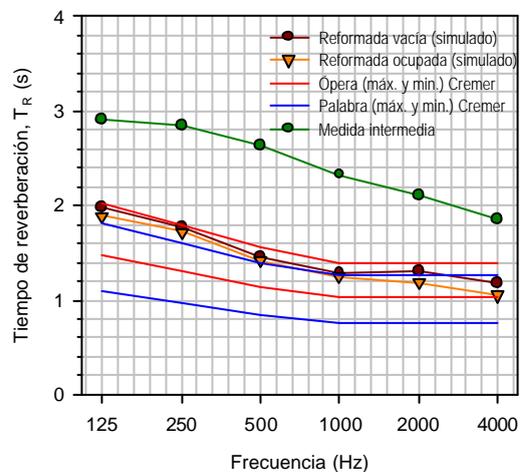


Figura 7.  $T_R$  medido en el estado intermedio, simulados tras la reforma y bandas recomendadas.

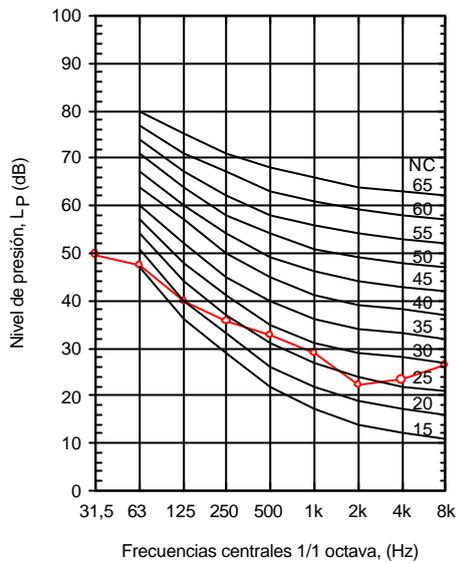


Figura 8. Calificación NC del espectro de ruido de fondo.

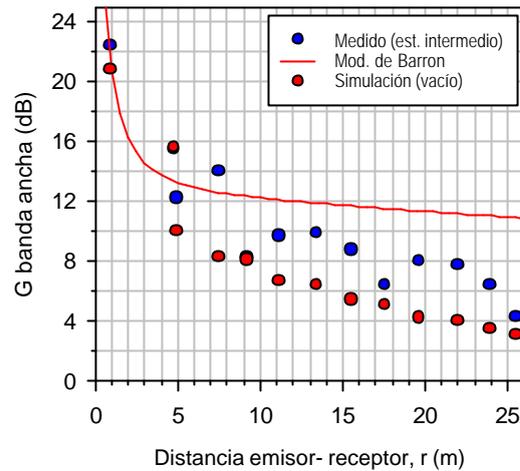


Figura 9. Factor G frente a la distancia (sala vacía).

Otros resultados significativos de la simulación se muestran a continuación. En la fig. 9 se han representado los valores de la fuerza acústica (G), en banda ancha, frente a la distancia comparada con los valores previstos por el modelo de Barron<sup>4</sup>. Como puede apreciarse, en la misma figura aparecen también los valores medidos (deducidos de la respuesta al impulso obtenida con MLSSA) en el estado intermedio. Queremos destacar la coherencia de los resultados, al disminuir los valores simulados frente a los medidos. Hay que tener en cuenta que la medida se ha realizado antes de aplicar el tratamiento y que, por tanto, la sala presenta todavía un carácter demasiado vivo.

Los valores simulados de la claridad (en la hipótesis de sala vacía) se muestran en la fig. 10, para todas las bandas de octava y todos los receptores. Hay que señalar que el identificador de los receptores es creciente con la distancia, por lo que la figura es indicativa del comportamiento de este parámetro con la distancia emisor-receptor. Si recordamos que el rango de valores recomendados de  $C_{80}$  para auditorios es [-4, 4] dB, los valores simulados, para todos los receptores, están dentro de este rango.

En la fig. 11 aparecen los valores de la definición para todas las frecuencias y para todos los receptores, en función de este parámetro podríamos calificar la inteligibilidad de la palabra como *aceptable*. Es de destacar el repunte del mismo en los receptores situados tanto en el coro como bajo él.

La inteligibilidad de la palabra se ha evaluado también mediante el índice RASTI<sup>5</sup>. Los resultados se muestran en la tabla 1, donde, para los valores simulados, se ha tenido en cuenta el espectro de ruido de la fig. 8. En ella, además de los valores simulados en las dos hipótesis, se

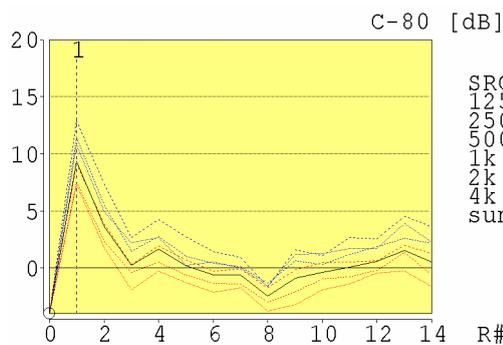


Figura 10.  $C_{80}$  simulado para todos los receptores y todas las bandas de octava (hipótesis vacía).

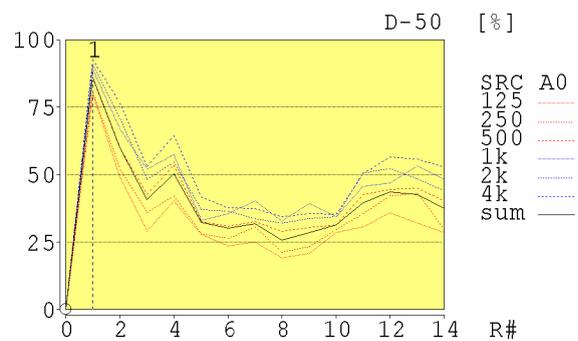


Figura 11.  $D_{50}$  simulado para todos los receptores y todas las bandas de octava (hipótesis vacía).

muestran los resultados de la medida en el estado intermedio. Como vemos la calificación coincide con la de los valores de  $D_{50}$ . Así mismo, vemos que el tratamiento, una vez ejecutado en su conjunto supondrá una mejora apreciable de la inteligibilidad en todos los puntos de la sala. También en este caso, los valores simulados presentan un repunte en los puntos situados en el coro y bajo el mismo.

**Tabla 1.** Inteligibilidad valorada por el índice RASTI.

Recep.	Medida intermedia		Simulación			
			Sala vacía		Sala ocupada	
	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación
1	0.862	Excelente	0.79	Excelente	0.80	Excelente
2	0.393	Pobre	0.62	Buena	0.64	Buena
3	0.446	Pobre	0.52	Aceptable	0.53	Aceptable
4	0.512	Aceptable	0.54	Aceptable	0.55	Aceptable
5	0.421	Pobre	0.47	Aceptable	0.48	Aceptable
6	---	---	0.46	Aceptable	0.48	Aceptable
7	---	---	0.47	Aceptable	0.48	Aceptable
8	---	---	0.42	Pobre	0.43	Pobre
9	---	---	0.48	Aceptable	0.48	Aceptable
10	---	---	0.46	Aceptable	0.48	Aceptable
11	0.408	Pobre	0.51	Aceptable	0.52	Aceptable
12	0.434	Pobre	0.53	Aceptable	0.53	Aceptable
13	0.424	Pobre	0.55	Aceptable	0.56	Aceptable

## 5. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados del análisis acústico presentado anteriormente, se han efectuado recomendaciones constructivas que, con carácter general, han sido incluidas en el proyecto final. Entre ellas, la segregación del volumen de las naves laterales y el tratamiento mediante paneles absorbentes sonoros en los revestimientos y acabados de los paramentos laterales, dados los elevados tiempos de reverberación que se obtenían para todas las frecuencias. El uso mixto de paneles con distintas superficies de perforación y espesores de la cámara de aire, resulta ser bastante eficaz, sobre todo debido a la gran superficie tratada, situando los tiempos de reverberación en un intervalo de valores verdaderamente aceptable para un uso escénico.

La simulación ha puesto de manifiesto que una vez ejecutado el programa de rehabilitación, el comportamiento acústico del espacio mejorará sustancialmente, de modo que los parámetros objetivos más significativos se sitúan en un rango de valores aceptable para los usos a los que se pretende dedicar la sala.

Una vez que termine la rehabilitación tendremos ocasión de efectuar una nueva y detallada medida que podrá poner de manifiesto la utilidad de las soluciones adoptadas, por un lado, y la precisión de la simulación al estimar los valores de los parámetros acústicos.

## REFERENCIAS

1. **Norma UNE-EN ISO 3382:2001** "Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos".
2. **CATT-Acoustic v 7.2. (1999)**. Room acoustics prediction and desktop auralization. CATT, Gothenburg (Suecia).
3. **Cremer, L., Müller, H.A. y Schultz, T.J. (1982)**. *Principles and applications of room acoustics*. Volumen 1. Londres, Applied Science Publishers, pp. 610-627, 1955.
4. **Barron M., Lee L. J.** *Energy relations in concert auditorium. I*. The Journal of the Acoustical Society of America, 84 (2), pp. 618-628, 1998.
5. **Hougast, T. y Steeneken, H. J. M. (1985)**. *A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria*. The Journal of the Acoustical Society of America, 77 (3), pp. 1069-1077, 1983.