



Resultados de la Corrección Acústica de un Recinto Eclesial tras su Rehabilitación como Espacio Escénico

S. Muñoz, J. J. Sendra, T. Zamarreño and J. Navarro^a

^a *Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (IUCC), Universidad de Sevilla, ETS de Arquitectura de Sevilla, Av. Reina Mercedes, 2. 41012 Sevilla, España, Tlf.: 95 455 16 30, Fax: 95 455 70 24, munoz@us.es*

RESUMEN: Cada vez con más frecuencia, nos encontramos con ejemplos de antiguos espacios eclesiásticos, en avanzado estado de deterioro y abandono, cuya única salida para su conservación es la de albergar usos diferentes de aquellos para los que fueron concebidos. En un trabajo anterior presentamos el estudio previo y las propuestas de actuación correspondientes a uno de estos casos: la rehabilitación y adecuación como espacio escénico, para un uso multifuncional, de la Iglesia del Antiguo Convento de la Compañía de Jesús en Jerez de la Frontera (Cádiz). Una vez concluido el proceso de reforma, estamos en condiciones de comprobar cuál ha sido el resultado y hasta qué punto se han alcanzado los objetivos planteados en la propuesta inicial. Se muestran aquí, en comparación con las previsiones, los aspectos más relevantes de dicho estudio, apoyándonos en las medidas experimentales realizadas durante y después de la rehabilitación.

ABSTRACT: It's becoming more and more frequent the case of some ancient ecclesial spaces with advanced injury and withdrawal conditions. To hold their preservation, the only way for these buildings is keeping different applications from those for they were conceived. We have presented in a previous work the foregoing planning and the proceeding motions corresponding to one of these instances: adaptation as scenic space for multifunctional use and rehabilitation in the former Company of Jesus friary in Jerez de la Frontera (Cádiz).

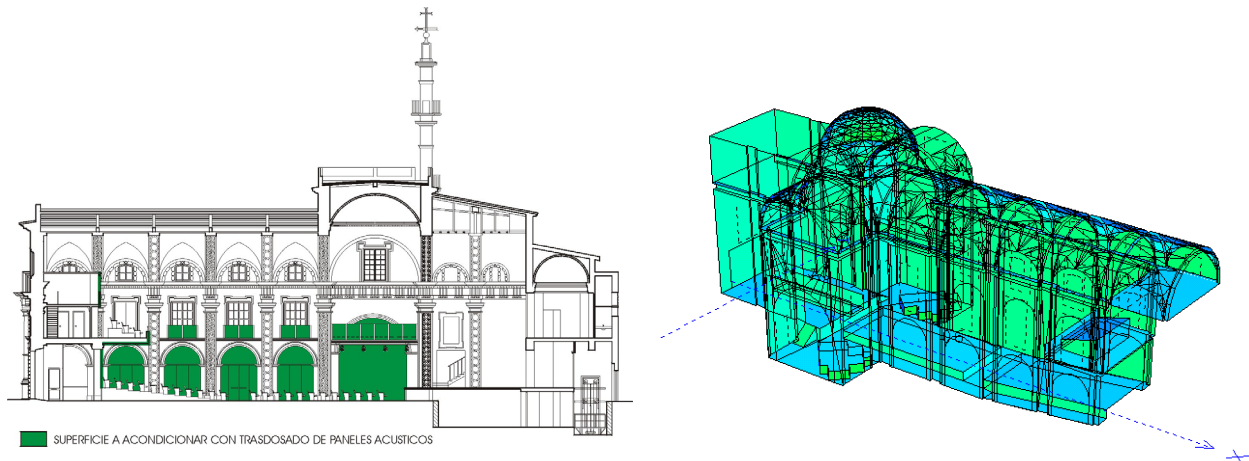
With the improvement process concluded, we have the means to check the results and to prove how the initial aims are achieved. We have shown here, beside the foresights, the more outstanding aspects in that study supporting on the experimental measurements made during the rehabilitation and after.

1. INTRODUCCIÓN

Presentaremos aquí el trabajo que hemos desarrollado, en relación con los aspectos acústicos, para el proyecto de rehabilitación de la Iglesia del Antiguo Convento de la Compañía de Jesús, en Jerez de la Frontera (Cádiz), para su utilización como espacio escénico de uso multifuncional.

Las características propias de este tipo de recintos eclesiales, con un elevado volumen en relación a su ocupación en planta, y el uso tradicional de materiales de revestimiento acústicamente reflectantes, son las principales causas de que su comportamiento acústico presente un tiempo de reverberación excesivamente largo y, en consecuencia, una deficiente inteligibilidad de la palabra o una insuficiente claridad musical.

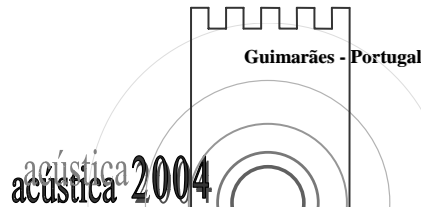
Para paliar estas deficiencias, en una primera fase, se realizó un estudio del comportamiento acústico del edificio mediante una medida “in situ” del tiempo de reverberación, siguiendo los requisitos prescritos por la norma UNE-EN ISO 3382:2001 [1]. A partir de los resultados de estas medidas, utilizando las ecuaciones analíticas clásicas, predimensionamos las soluciones a adoptar, compatibles con las propuestas formales del proyecto, con el fin de obtener las mejores condiciones acústicas posibles. En función de dicha medición, se propusieron tres actuaciones fundamentales: la primera suponía una reducción del volumen, al separar del volumen principal las naves laterales, que se dedicarán a usos expositivos, la segunda incidía en aumentar de forma significativa la absorción sonora mediante el uso de soluciones constructivas formalmente acordes al espacio a rehabilitar (fig. 1) y, finalmente, la tercera implicaba incrementar las reflexiones difusas adoptando geometrías que eliminen el efecto de grandes planos reflectantes.



Figuras 1 y 2 - Sección longitudinal con indicación de superficies a tratar (izquierda) y modelo informático para la simulación (derecha)

Cuando el proceso de rehabilitación estaba ya en un avanzado estado de ejecución, y el volumen de la sala se encontraba totalmente cerrado, se realizó otra serie de medidas que nos permitieron confirmar las recomendaciones inicialmente planteadas

A continuación, con el fin de evaluar su utilidad en estos procesos de rehabilitación, realizamos un modelo informático del espacio escénico propuesto (figs. 2 y 3), con el programa de software de simulación CATT-Acoustic [2], utilizando la documentación gráfica facilitada por los arquitectos redactores del proyecto, así como las medidas del estado inicial e intermedio para ajustar los coeficientes de absorción de los revestimientos iniciales. A partir de dicha simulación se estimaron los valores de los parámetros acústicos esperados, una vez ejecutadas las recomendaciones incorporadas al proyecto. De este modelo se ejecutaron dos versiones: una para el espacio vacío y otra con la audiencia presente. Los resultados y conclusiones de esta primera fase fueron presentados en el Congreso Nacional de Acústica TECNIACUSTICA-2003 [3].



La última fase, objeto de esta comunicación, ha tenido lugar una vez finalizada la ejecución de las obras (figs. 4 y 5), y ha consistido en la realización de una detallada serie de ensayos acústicos para evaluar hasta qué punto se habían alcanzado los objetivos previstos, así como una valoración de las condiciones acústicas alcanzadas en el interior del espacio escénico final.

2. EQUIPO Y PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Una vez concluida la rehabilitación del nuevo espacio escénico, se ha llevado a cabo una última medición “in situ”, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 3382:2001, a fin de comparar éstos resultados con los de la mediciones inicial e intermedia y con los calculados en la simulación informática, y obtener, de este modo, la calificación acústica de la sala, la validación de los modelos informáticos en los procesos de rehabilitación en este tipo de espacios y cuantificar la validez de las soluciones correctoras propuestas.

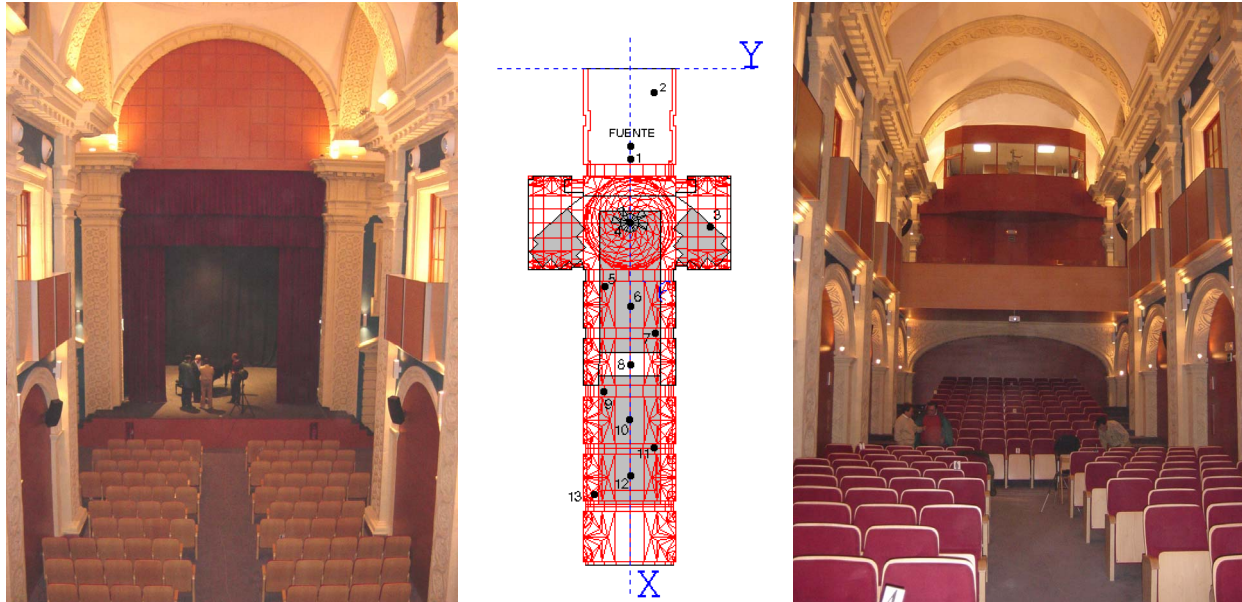
En la medición acústica final hemos utilizado señales MLS para obtener la respuesta al impulso del recinto, a partir de la cual hemos derivado la mayor parte de los parámetros. El sistema está implementado comercialmente mediante una tarjeta alojada en el ordenador y el software correspondiente con el nombre de MLSSA. El micrófono omnidireccional (B&K-4190) se situó a 1.20 m del suelo y la señal MLS se reprodujo mediante una fuente dodecaédrica omnidireccional (B&K-4296).

Aunque los valores del índice RASTI se midieron también utilizando la técnica MLS, los resultados presentados aquí corresponden al ensayo realizado con el equipo B&K-3361, que utiliza ruido modulado como señal de excitación, y que, esencialmente, coinciden aquellos. El espectro de ruido de fondo se midió utilizando el propio analizador MLSSA en modo “scope” para capturar la señal y promediando los espectros necesarios en el dominio de la frecuencia.

La posición de la fuente en la medición acústica final, así como la posición de los receptores, se encuentra reflejada en la figura 3. Naturalmente, las posiciones de la fuente y los receptores coinciden con las dispuestas en la medición acústica inicial e intermedia, así como con las de la simulación informática realizada, para facilitar la comparación de los resultados obtenidos en cada una de las fases.

3. ASPECTOS Y VARIABLES ACÚSTICAS ANALIZADAS

En las figuras 4 y 5 se observa el estado final del recinto tras su rehabilitación, destacando los tratamientos absorbentes utilizados (fig. 1), y su disposición, tras las recomendaciones de la fase inicial y las conversaciones mantenidas con la dirección facultativa a lo largo de la obra.



Figuras 3, 4 y 5 - Estado definitivo de la Sala. Vista hacia la escena (izquierda) y vista hacia la cabina (derecha). Ubicación de receptores sobre la superficie de audiencia (centro).

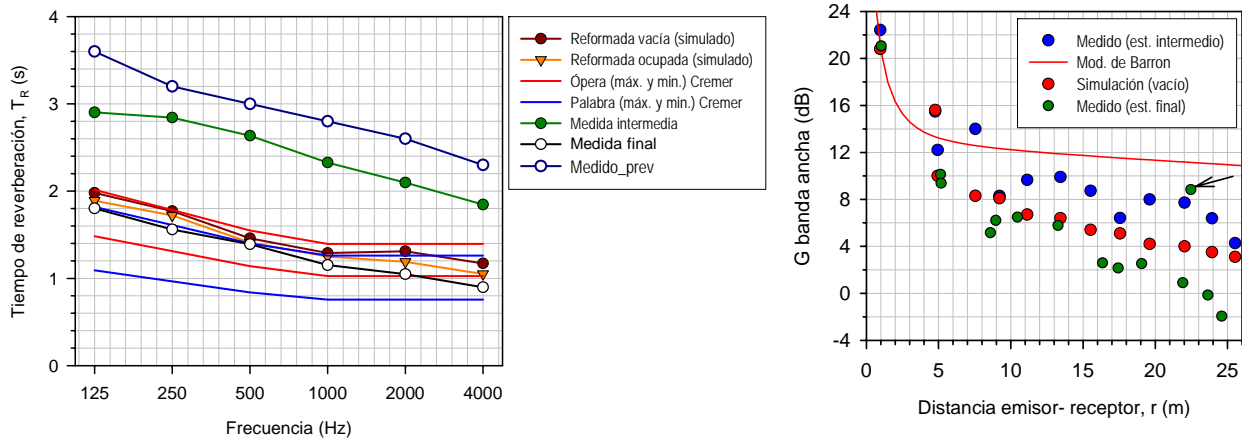
Los aspectos y variables más importantes analizados para esa valoración acústica son los siguientes: tiempo de reverberación, T_R (s), como indicador de la reverberación de la sala, fuerza acústica G como indicador de la distribución sonora, índice RASTI como indicador de la inteligibilidad, claridad, C_{80} (dB), como indicador de la claridad musical, e índice NC como indicador del ruido de fondo. Veamos, a continuación, cada uno de los aspectos e indicadores señalados, exponiendo los resultados obtenidos y realizando una valoración de los mismos.

3.1 Reverberación

En la gráfica de la figura 6 se presentan los valores del tiempo de reverberación para las distintas bandas de octava correspondientes a la medida acústica inicial, a la intermedia y a la final. Se incluyen, además, las curvas correspondientes a los valores obtenidos en el estado final simulado, con los asientos de la sala vacíos de público y ocupados. Asimismo, y con el objetivo de hacer una valoración de los resultados obtenidos, se presentan las curvas recomendadas (máxima y mínima), propuestas por Cremer [4], para un uso de la sala como teatro (palabra) y como teatro de ópera (ópera).

Únicamente para este último uso (ópera), la sala será un poco más sorda de lo esperado en las altas frecuencias.

Se puede constatar la similitud de resultados entre la medición acústica final y la simulación informática, en cuanto al valor del T_R (s), lo que pone de manifiesto la utilidad de estas técnicas en los procesos de rehabilitación, al menos en este aspecto.



Figuras 6 y 7 – Evolución del tiempo de reverberación durante el proceso de rehabilitación y valores deseables para el recinto según el uso del mismo (izquierda). Dependencia de la fuerza acústica (G) con la distancia emisor receptor (derecha)

3.2 Distribución Sonora

En la gráfica de la figura 7 se representa el valor de la fuerza acústica G (dB), en banda ancha, medida en los distintos puntos receptores, aunque se ha expresado ese valor en relación a la distancia emisor-receptor (m). En esa misma gráfica, a efectos de comparación, se representan también la variación de G con la distancia prevista por el modelo propuesto por Barron [5] para auditorios y salas de concierto. Asimismo, aparecen los valores obtenidos mediante la simulación informática.

De la observación de la gráfica se deduce que los valores de G medidos finalmente son algo menores de los obtenidos en la medición intermedia, lo que resulta normal ya que se ha aumentado notablemente la absorción sonora y, en consecuencia, el campo es menos reverberante en el estado final que en el estado intermedio.

La caída de los valores de G , conforme aumenta la distancia entre emisor y receptor, es más acusada que la prevista por Barron, lo que no resulta nada extraño dado que ese modelo fue propuesto para auditorios y salas de conciertos, espacios que presentan notables diferencias formales respecto del que nos ocupa. Los resultados obtenidos en esta iglesia están en consonancia con los obtenidos por nuestro equipo en espacios eclesiales, resultados que han sido publicados y presentados a congresos[6].

Existe similitud entre los valores de G obtenidos en la medición acústica final y los simulados. Únicamente hay cierta dispersión para los puntos más alejados de la fuente, debido, principalmente, a que la sala es un poco más absorbente, finalmente, de lo previsto en el modelo. El resultado señalado con una flecha en la figura 7 es anormalmente alto. Se trata del punto 14, que ve interrumpida la llegada de sonido directo por el peto del coro.

3.3 Inteligibilidad

La inteligibilidad de la palabra se ha evaluado mediante el índice RASTI [7]. En la tabla 1, se presentan los valores de dicho índice obtenidos, para los distintos receptores, en la medición acústica intermedia y final, así como los calculados mediante la simulación informática. En las columnas anexas, en cada caso, se ha añadido la calificación que merece el índice RASTI de acuerdo a la escala de valores normalmente establecida (fig. 8).

Tabla 1. Inteligibilidad valorada por el índice RASTI

Receptor	Medida intermedia (sala vacía)		Medida final (sala vacía)		Simulación			
	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Sala vacía		Sala ocupada	
					Valor	Calif.	Valor	Calif.
1	0.86	Excelente	0.95	Excelente	0.79	Excelente	0.80	Excelente
2	0.39	Pobre	0.58	Aceptable	0.62	Buena	0.64	Buena
3	0.45	Pobre	0.66	Buena	0.52	Aceptable	0.53	Aceptable
4	0.51	Aceptable	0.68	Buena	0.54	Aceptable	0.55	Aceptable
5	0.42	Pobre	0.61	Buena	0.47	Aceptable	0.48	Aceptable
6	---	---	0.62	Buena	0.46	Aceptable	0.48	Aceptable
7	---	---	0.54	Aceptable	0.47	Aceptable	0.48	Aceptable
8	---	---	0.55	Aceptable	0.42	Pobre	0.43	Pobre
9	---	---	0.54	Aceptable	0.48	Aceptable	0.48	Aceptable
10	---	---	0.60	Buena	0.46	Aceptable	0.48	Aceptable
11	0.41	Pobre	0.60	Buena	0.51	Aceptable	0.52	Aceptable
12	0.43	Pobre	0.68	Buena	0.53	Aceptable	0.53	Aceptable
13	0.42	Pobre	0.69	Buena	0.55	Aceptable	0.56	Aceptable
14	---	---	0.53	Aceptable	---	---	---	---

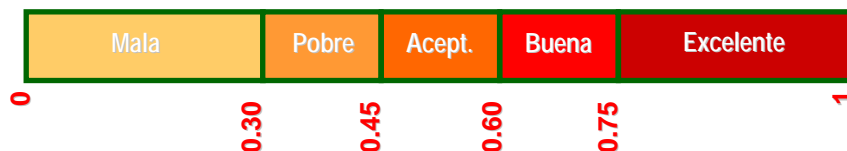


Figura 8 - Escala de valoración de la inteligibilidad en función del índice RASTI.

De la observación de esa tabla, se puede afirmar que la inteligibilidad medida finalmente, con la sala vacía, mejora sensiblemente lo obtenido en la medición acústica intermedia, llegando a alcanzar la calificación de buena prácticamente en todos los puntos de la misma. Únicamente en algunos puntos situados en el centro de la nave hay una ligera bajada de los índices RASTI, próximos en cualquier caso a 0.60, límite inferior de lo considerado como buena inteligibilidad.

Previsiblemente, esos ya de por sí buenos valores de la inteligibilidad, mejorarán cuando la sala esté ocupada de público, al aumentar la absorción sonora y disminuir así los tiempos de reverberación.

Los valores medidos en el estado final son aún mejores que los obtenidos con la simulación informática, en parte debido a que la sala finalmente es algo más absorbente de lo previsto en la simulación y, además, según hemos constatado también en trabajos anteriores, la simulación del índice RASTI con ayuda del programa informático utilizado tiende a dar valores algo menores de los finalmente medidos en espacios eclesiales.

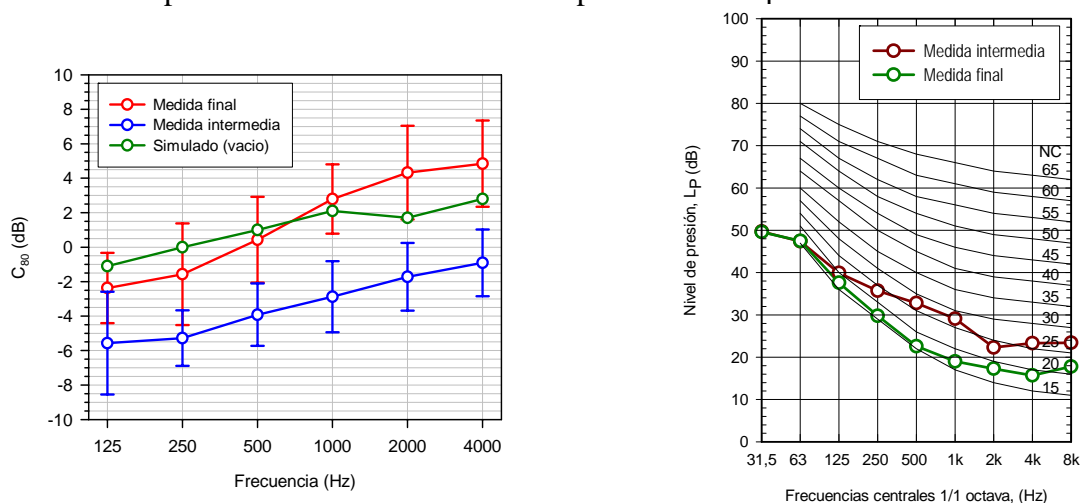
Hay que señalar que en ningún caso se ha utilizado sistemas de apoyo electroacústico. Si estos se instalaran en la sala, estas condiciones garantizan el máximo rendimiento de los mismos.

3.4 Claridad Musical

En la figura 9 se presentan los valores del indicador C_{80} (dB) obtenidos en la medición acústica intermedia y final, para las distintas bandas de frecuencia, así como los obtenidos en la simulación informática. Las barras verticales son indicadores, dados por la desviación estándar, de la dispersión espacial de los valores medidos en los diferentes puntos.

Si recordamos que en auditorios se recomiendan valores promedio de las bandas de octava comprendidas entre 500 y 2000 Hz comprendidos entre -4 y 8 dB para este índice, de la observación de la gráfica podemos indicar que los valores de C_{80} medidos en el estado intermedio se mantienen dentro de la banda aconsejable, aunque próximos a los límites inferiores de esa banda, correspondientes a una “sala viva”. Por el contrario, los valores del indicador C_{80} medidos en el estado final crecen respecto de la medición intermedia, manteniéndose también en la banda aconsejable pero en la parte alta de la misma. Son más propios de una sala más apagada, idóneo para una sala polifuncional como esta.

Hay una gran similitud de resultados entre los obtenidos en la medición acústica final y los obtenidos mediante la simulación. Ello viene a confirmar la idoneidad de estas técnicas para predecir el comportamiento acústico de estos espacios tras los procesos de rehabilitación.



Figuras 9 y 10 - Valores promedio y dispersión espacial para la claridad musical (izquierda)
Valoración del ruido de fondo mediante las curvas NC (derecha)

3.5 Ruido de Fondo

En la figura 10 se presentan los espectros del ruido de fondo, promediados temporalmente durante unos 5 minutos, en bandas de octava, superpuestos sobre las curvas de valoración NC, lo que nos permite obtener este índice de valoración del ruido de fondo. Los resultados presentados corresponden a la medición acústica final y a la intermedia.

Los niveles sonoros medidos en el estado final, son sensiblemente inferiores a los obtenidos en la medición intermedia. Como consecuencia de ello, se pasa de un índice en torno a NC-30 en el estado intermedio, a NC-20 (excluyendo la frecuencia de 8 KHz) en el estado final,



valor claramente inferior al límite de NC-25 que no debería ser sobrepasado para un uso musical, o NC-30 para el caso de teatros y salas de conferencias.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la medición acústica final, expuestos de manera detallada en los anteriores apartados, ponen de manifiesto que es posible acometer con garantía de éxito los proyectos de rehabilitación, sobre todo en lo referido a la elección y disposición de los revestimientos que se comportan como absorbentes acústicos (fig. 1) y la determinación de su geometría, sobre todo cuando las decisiones se toman en la fase de anteproyecto y de forma coordinada con los redactores del mismo.

Los valores obtenidos en la medición acústica del tiempo de reverberación, inteligibilidad de la palabra, claridad musical, ruido de fondo, y el análisis de la distribución del campo sonoro en el interior de la sala permiten valorar de forma positiva el comportamiento acústico del espacio tras su rehabilitación para su uso como sala polifuncional. Además, nos ha permitido evaluar la idoneidad de los modelos informáticos en este tipo de proyectos.

Consideramos, pues, alcanzados los objetivos que se marcaron desde el principio a la hora de abordar las correcciones acústicas de la Iglesia de la Compañía de Jesús de Jerez de la Frontera para su rehabilitación como espacio escénico.

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.f. (1999). Room acoustics prediction and desktop auralization. CATT, Gothenburg (Suecia).
- [3] S. Muñoz Muñoz, T. Zamarreño García, J. J. Sendra Salas, y J. Navarro Casas; *Rehabilitación de un espacio eclesial como espacio escénico*. TECNIACUSTICA 2003, 34º Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Acoustics Association Symposium. Bilbao, Octubre de 2003.
- [4] L. Cremer, H. A. Müller, y T. J. Schultz; (1982). *Principles and applications of room acoustics*. Volumen 1. Londres, Applied Science Publishers, pp. 610-627, 1955.
- [5] M. Barron, L. J. Lee; *Energy relations in concert auditorium. I*. The Journal of the Acoustical Society of America, 84 (2), pp. 618-628, 1998.
- [6] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro; *An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches*. Computational Acoustics and its Environmental Applications II, pp. 139-148, (editores Brevia C. A., Kenny J., Ciskowski R. D.), ed. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1997.
- [7] T. Hougast, y H. J. M. Steeneken; (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.