

Aspectos acústicos en la rehabilitación del salón de plenos del Parlamento Andaluz Viabilidad de una simulación por ordenador

T. Zamarreño, J. Algaba, F. J. Nieves, M. Galindo.

Inst^o Univ. de Ciencias de la Construcción. E.T.S. de Arquitectura. Dpto. de Física Aplicada.
Universidad de Sevilla. Reina Mercedes, 2. 41012 - SEVILLA.

1. INTRODUCCION

Una de las intervenciones de rehabilitación (aún sin culminar) más importantes llevadas a cabo en los últimos tiempos en Andalucía, ha sido la del Hospital de las Cinco Llagas como sede del Parlamento Andaluz. El edificio es un magnífico ejemplo de arquitectura civil renacentista de 27000 m², organizado en torno a ocho patios que rodean la iglesia, hoy Salón de Plenos, obra de Hernán Ruiz. Su planta de cruz latina, con capillas laterales, se cubre con bóvedas de cantería que descargan sobre muros y pilastras del mismo material. Tiene un volumen de 12000 m³, con una altura media de 20 m, una superficie interior de 6000 m², de los que 450 corresponden a la planta útil a ocupar por unas 300 personas. Ello proporciona: un volumen/plaza de 40 m³ (frente a los 4 recomendables); una razón volumen/area en planta de 26 m (frente a los 8 deseables) y una densidad de ocupación baja, pero aceptable, de 1.5 m²/persona.

Hemos intervenido, en estrecha colaboración con la dirección facultativa, en todos los aspectos acústicos ligados al proceso de rehabilitación y en esta comunicación hacemos un resumen del trabajo desarrollado y de los resultados alcanzados, así como un breve apunto sobre la viabilidad de la simulación informática, realizada a posteriori, centrándonos en los aspectos más relacionados con la inteligibilidad.

2. ESTADO PREVIO

En este apartado presentamos los valores de los parámetros medidos antes de acometerse la rehabilitación. Hay que indicar que todas las medidas se hicieron con el recinto vacío.

Reverberación: Se realizaron medidas de T_R , utilizando el método del impulso integrado¹, mediante un sonómetro B&K-2231, equipado con el módulo BZ-7104. Se obtuvieron valores de EDT, T_R^{20} y T_R^{30} , en bandas de 1/3 de octava, en varios puntos para promediar espacialmente (Fig. 1)

Ruido de fondo: La principal fuente de ruido en torno a la iglesia es el tráfico. En la acera, a 1.5 m del suelo, se midieron niveles sonoros comprendidos entre 74 y 82 dB(A). Los jardines que preceden al Hospital y los edificios que rodean la iglesia rebajan estos valores hasta los 42-45 dB(A) medidos en el patio y los 32-34 dB(A), en el interior de la misma.

Inteligibilidad: Los primeros ensayos se realizaron utilizando las pruebas subjetivas de percepción de logatomos², complementados luego con medidas del índice RASTI³, mediante el equipo B&K-3361. Los resultados de la Fig. 2 (E. previo), permiten calificar la inteligibilidad de POBRE.

3. RECOMENDACIONES PARA LA CORRECCION

Reverberación: Los valores de T_R resultaron muy elevados para la función a la que se pretendía destinar la iglesia, sobre todo a bajas frecuencias. Puesto que no era posible actuar sobre el volumen, la única opción era aumentar la absorción acústica, cuidando que los materiales tuvieran un comportamiento, respecto de la frecuencia, que nos permitieran ajustar los valores de T_R a los recomendados. Estos se determinaron a partir de la fórmula empírica²: $T_R^{OP}=f \cdot u \cdot i \cdot V^{1/3}$, donde T_R^{OP} es el tiempo de reverberación recomendado (s), V el volumen, f valora la dependencia respecto de la frecuencia, u el uso del recinto (palabra 0.075) e i la presencia (0.85) o no (1) de apoyo electroacústico.

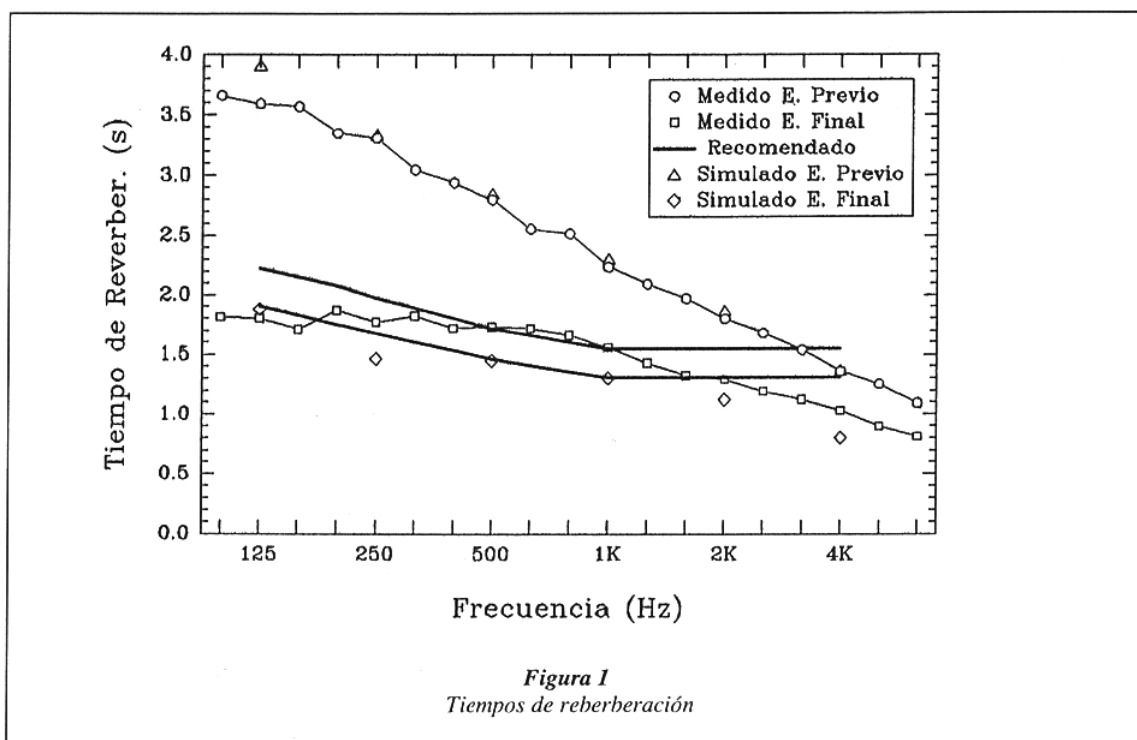


Figura 1
Tiempos de reverberación

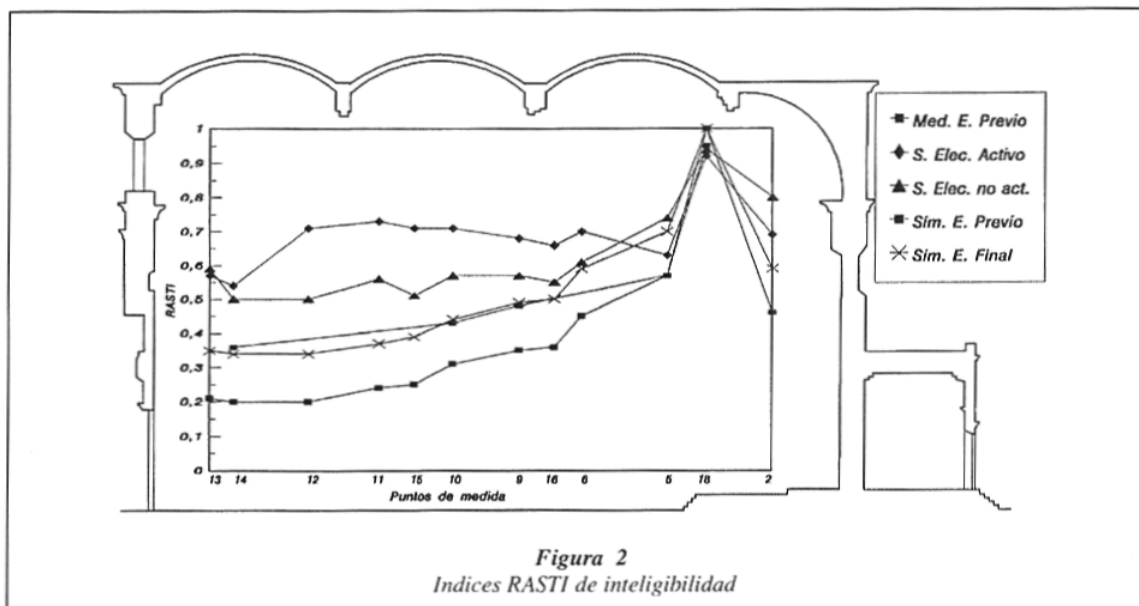
La diferencia entre los T_R medidos y los recomendados (Fig. 1), muestran que se ha de añadir absorción a bajas y medias frecuencias, por lo que hubo que diseñar absorbentes del tipo membrana y resonadores de Helmholtz acoplados. Para ampliar la banda de absorción a bajas frecuencias, se combinaron paneles sin perforar y perforados, con distintas densidades de perforación, que se dimensionaron teóricamente a partir de fórmulas empíricas⁴, para situar las frecuencias de resonancia de los diferentes orificios cubriendo el rango 125-400 Hz. Para aumentar la absorción de los mismos a frecuencias medias, estos paneles se trasdosaron con una manta de lana mineral, y cámara de aire y se recubrieron con una espuma delgada de tapicero y tela de terciopelo para la terminación de su cara vista.

En el laboratorio se ensayaron muestras de paneles y moqueta, con el tubo de ondas estacionarias, para obtener el coeficiente de absorción y la impedancia acústica compleja, bajo incidencia normal. A partir de estas medidas, se evaluó teóricamente^{4,5}, el coeficiente de absorción del material en condiciones de incidencia aleatoria, que se utilizó para estimar los T_R esperados tras la rehabilitación⁶.

Los estudios de rayos realizados en la primera fase, la existencia de grandes paños paralelos muy reflectantes, tanto en el crucero como en la nave, y la utilización de las capillas laterales para alojar los conductos de aire acondicionado, determinaron las zonas para su colocación. De acuerdo con la dirección facultativa, se pudieron instalar 600 m² de paneles en los paños verticales de piedra, y actuar sobre los 400 m² de la planta, cubriéndola con una moqueta de pelo largo. Además, los frentes de los pupitres se diseñaron en forma de rejilla para aumentar la eficacia absorbente del suelo.

Ruido de fondo: La incidencia de los niveles del ruido de tráfico en el interior, no era significativa; incluso sería menor tras la rehabilitación al reforzarse el aislamiento de los huecos superiores de los muros. Para prevenir el efecto del ruido generado por la propia actividad en el edificio, se recomendó: a) Reforzar el aislamiento de los cancelos de acceso. b) Evitar la inmisión de ruido a través de la instalación de aire acondicionado (cámaras de plenum, silenciadores, conductos absorbentes). c) Instalar moqueta en el suelo para evitar el ruido producido por pisadas y mobiliario. Se pretendía alcanzar la calificación de clase NC-30.

Inteligibilidad: Las recomendaciones anteriores redundarían sin duda en un incremento de la inteligibilidad, dado que el análisis de las *Funciones de Transferencia de Modulacion (MTF)*, medidas en el estado previo, revelaron que la reverberación era un factor determinante de la degradación de los valores RASTI. Por otro lado, las medidas tomadas para controlar los niveles de ruido, impedirán que éste tenga consecuencias negativas sobre aquella en el uso normal de la iglesia. A pesar de ello, dadas las dimensiones del recinto, la inteligibilidad de la palabra podría quedar comprometida en las zonas más alejadas de la fuente sonora; de modo que, para aumentar el nivel de la señal, se propuso la instalación de un sistema electroacústico distribuido y direccional orientado hacia la zona de la audiencia (muy absorbente).



4. ESTADO FINAL

Nos referimos aquí a los resultados alcanzados tras la rehabilitación. También ahora las medidas se realizaron con la iglesia vacía pero ya equipada con su mobiliario.

Reverberación: Para determinar T_R , utilizamos ahora el método del ruido interrumpido. Todo el proceso estaba controlado por un analizador B&K-2133. El ruido era generado, e interrumpido, por el propio analizador, lo que permitía automatizar el proceso y promediar temporalmente. El altavoz se ubicó en el punto de emisión (tribuna de oradores). Tras el corte de la señal, el propio analizador registraba el espectro de la caída, en bandas de 1/3 de octava, a razón de 1 espectro cada 20 ms, promediando temporalmente en cada punto hasta 5 caídas para compensar las variaciones aleatorias inherentes al método. Las curvas de extinción obtenidas se analizaron, de forma interactiva, mediante un programa elaborado por nosotros en el entorno MatLab calculando los valores de EDT , T_R^{20} y T_R^{30} . Los resultados de la Fig. 1 muestran hasta qué punto se alcanzaron los objetivos propuestos.

Ruido de fondo: Puesto que los cancelos de entrada son los puntos acústicamente más débiles y los dos laterales se encuentran relativamente próximos a una sala técnica, se realizaron medidas de su aislamiento. Encontramos valores de 41 dB(A) (NBE-CA) y de 41.5 para el Índice de Aislamiento a Ruido Aéreo (norma ISO). Para valorar el ruido de fondo, medimos su espectro en bandas de 1/3 de octava y lo representamos sobre las curvas de valoración NC, observando que éste está por debajo de la NC-25, con lo que se cumplía con lo previsto.

Inteligibilidad: El ensayo se realizó primero con el sistema electroacústico desconectado y, posteriormente, situando el transmisor B&K-4225 a 35 cm del micrófono de la tribuna de oradores y emitiendo la señal a través del citado sistema. En la Fig. 2 se representa, a efectos de comparación, los valores del índice RASTI medidos en la dirección longitudinal de la iglesia. Los valores de las FTM son mayores tras la reforma, lo que proporciona valores más altos del RASTI (calificación de *ACCEPTABLE*), pero manteniendo la forma típica correspondiente a la incidencia de la reverberación. Cuando el sistema electroacústico está activo, estas funciones tienden a ser horizontales, aproximando su forma a las FTM correspondientes a la interferencia única del ruido de fondo, y dando valores aún mayores de los índices RASTI (calificación de *BUENA*).

5. SIMULACION POR ORDENADOR

Se ha realizado la simulación con el sistema de acústica geométrica Raynoise versión 2.1, en un ordenador PC 486 con 16 MB de RAM, ampliada con el EMM386. El modelo del recinto se generó con un programa de CAD, exportando el mismo como fichero DXF. La geometría se ha simplificado lo mínimo, obteniéndose un modelo muy detallado con 1350 elementos planos, lo cual ha requerido tiempos de análisis algo elevados, pero no determinantes, de entre dos y tres horas. El análisis realizado ha contemplado aspectos como los de reverberación, mapeado e image, con el método CBM (Conical Beam Method). El mapeado se ha hecho sobre una superficie receptora que cubre toda la planta elevada 1.22 m, mientras que el análi-

sis en la opción image se hizo con micrófonos en los mismos puntos utilizados en las medidas in situ. El análisis se han repetido para los estados previo y final, definidos a partir del mismo fichero *DXF*, pero alterando la transparencia de los elementos con el fin de dar cuenta de todos los cambios.

La simulación del estado previo se hizo ajustando la absorción de la piedra, que suponía más del 80% de la superficie interior total, a fin de que los datos de T_R coincidieran con los medidos in situ, pues no tendría sentido partir de una simulación poco fiable, ya que, de hecho, no conocíamos con precisión la absorción de la piedra.

Esta simulación ha permitido obtener numerosos resultados que nos permiten comparar parámetros acústicos entre ambos estados, así como con los datos reales medidos, concluyendo que, en general, la simulación puede ser de gran ayuda, incluso en recintos tan complejos como este, evidenciando además que los resultados obtenidos a partir de la respuesta al impulso simulada están más cerca de los medidos que los calculados a partir de las fórmulas teóricas. En las Fig. 1 y 2 se pueden observar algunos de los resultados de la simulación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M.R. SCHRÖEDER: *New Method of Measuring Reverberation Time*. J. Acoust. Soc. Amer. 37, 1965, pp. 409-12.
- [2] J.PEREZ MIÑANA: *Compendio Práctico de Acústica Aplicada*. Ed. Labor, Barcelona. 1969.
- [3] H. J. M. STEENEKEN, T. HOUTGAST: RASTI: *A Tool for Evaluating Auditoria*. Technical Review, Nº 3, 1985. Brüel & Kjaer. *A Review of the MTF Concept in Room Acoustics and its Use for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria*. J. of Acous. Soc. of Am., 77, 1060-77, 1985.
- [4] H. KUTTRUFF: *Room Acoustics*. Ed. Elsevier Applied Science, London. 1991.
- [5] L. CREMER, H. A. MÜLLER. *Principles and Application of Room Acoustics*. Vol. I. Trad. T. J. Schultz. Ed. Applied Science Publisher. London, 1982.
- [6] T. ZAMARREÑO, J. ALGABA: *Medida de la Impedancia Acústica Específica para Incidencia Normal*. TecniAcústica'93. Valladolid.