

## El campo sonoro en las Iglesias Gótico-Mudéjares con cubierta de madera: aplicación del modelo de Barrón

Juan J. Sendra<sup>\*</sup> y Teófilo Zamarreño<sup>\*\*</sup>

Inst<sup>º</sup> Univ. de Ciencias de la Construcción. E.T.S. de Arquitectura. Avda. Reina Mercedes, 2.  
41012-SEVILLA. (\*) Dpto. Construcciones Arquitectónicas I. (\*\*) Dpto. Física Aplicada

### 1. INTRODUCCION

El problema de la corrección acústica de iglesias, en España y otros países de rico patrimonio arquitectónico, resulta de gran actualidad e interés en el campo de la acústica aplicada. En efecto, numerosas poblaciones poseen una o varias iglesias de gran interés artístico y, por el contrario, carecen de edificios civiles capaces de albergar actividades culturales (teatrales, conferencias, musicales). Ello ha dado lugar a una política cultural tendente a utilizar esas iglesias como recintos para representaciones y audiciones, bien de un modo estable tras una reforma del edificio, o de modo esporádico compartiendo esas funciones con las propiamente religiosas y de culto.

Frecuentemente, antes de tomar esa decisión, no se han analizado las condiciones acústicas interiores, en muchos casos muy deficientes, ni se ha contemplado como objetivo un adecuado acondicionamiento acústico de la iglesia, lo cual ha originado notables fracasos funcionales. Los valores históricos y arquitectónicos del espacio interior: tipológicos, funcionales y formales, y su repercusión sobre las condiciones acústicas del mismo, aconsejan tratar de un modo específico la labor de su corrección acústica.

El trabajo que aquí se presenta forma parte de un estudio acústico general realizado sobre un tipo eclesial, caracterizado en principio por sus no deficientes condiciones acústicas, del que existe en la provincia de Sevilla, una muestra muy representativa. En concreto se han estudiado las condiciones acústicas de diez iglesias gótico-mudéjares de la ciudad de Sevilla, todas ellas de tres naves, cubiertas con armaduras de madera, y presbiterio abovedado. Este tipo eclesial ha sido considerado por el prestigioso estudioso Diego Angulo como "el tipo parroquial sevillano"<sup>1</sup>. Aunque la fecha de construcción es variable y poco conocida, según los casos, se puede estimar, en conjunto, entre los siglos XIII y XV. Todas ellas siguen utilizándose hoy para el culto. En la Fig. 1, como ejemplo, se presentan la planta y sección de una de ellas.

### 2. ANALISIS DE LA DISTRIBUCION SONORA: MODELO DE BARRON

Dentro del amplio esquema de trabajo desarrollado, uno de los aspectos analiza-

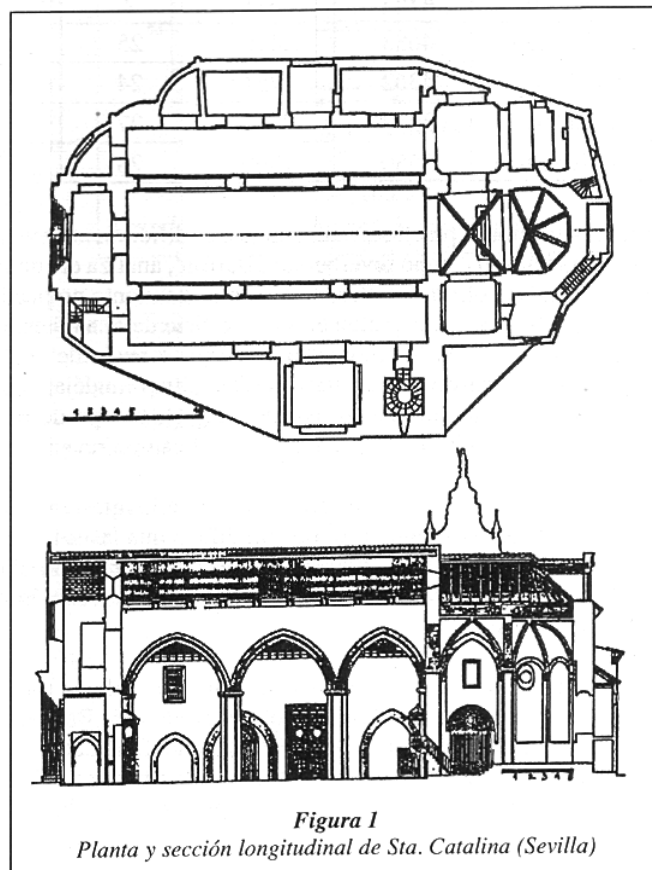


Figura 1  
Planta y sección longitudinal de Sta. Catalina (Sevilla)

dos ha sido el de la distribución sonora en el interior. El proceso de medida de los niveles acústicos se llevó a cabo utilizando una fuente de referencia (B&K-4205) de forma que conocíamos el nivel de potencia de emisión ( $L_w$ ). Tras la oportuna calibración del sistema, en cada punto del recinto seleccionado se hacía un registro, de unos 20 s de duración, mediante un *DAT Sony PC204*, que era posteriormente procesado en el laboratorio con la ayuda de un analizador *B&K-2133*, para obtener los niveles globales y en bandas de octava.

La expresión clásica para el nivel de presión sonora en el interior de un recinto reverberante (campo difuso) incorpora dos términos: el correspondiente al sonido directo, que depende de la distancia a la fuente y el del sonido reflejado, independiente de la posición:

$$L = L_w + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (1)$$

donde  $L_w$  es el nivel de potencia que emite la fuente,  $r$  la distancia fuente-receptor y  $A$  la absorción acústica del recinto, que conviene expresar en función de los valores medidos del tiempo de reverberación,  $T$ , mediante la relación:

$$A = \frac{0.162V}{T} \quad (2)$$

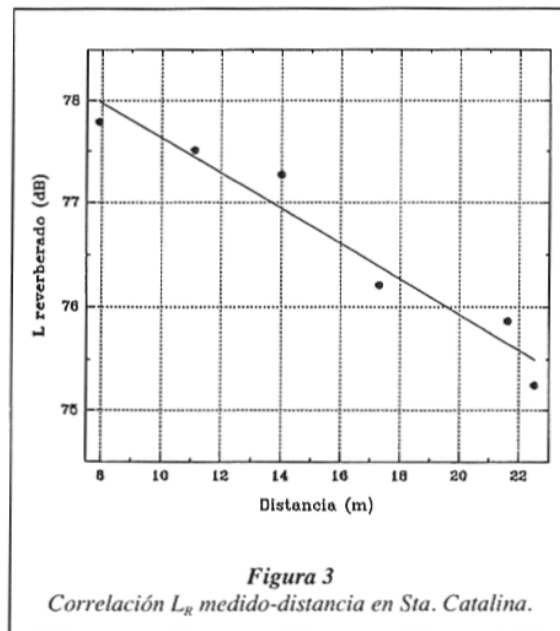
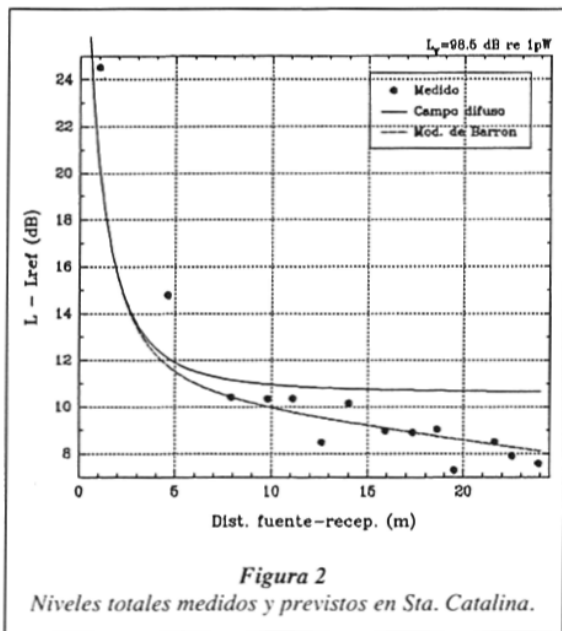
*Tabla 1. Parámetros característicos de algunas iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*

Iglesia	V (m <sup>3</sup> )	S (m <sup>2</sup> )	d <sub>MAX</sub> (m)	T (s)	r <sub>c</sub> (m)	$\alpha_M$	m (dB/m)
Sta. Marina	8696	3988	36	4.0	7.0	0.09	-0.09
S. Vicente	6915	3290	24	1.8	12.3	0.19	-0.26
S. Julian	6226	2984	27	3.7	5.4	0.09	(-0.10)
S. Gil	6200	2931	24	2.5	7.9	0.14	-0.37
S. Pedro	6108	2758	22	2.0	9.8	0.18	-0.17
S. Marcos	4763	2671	2	3.9	3.9	0.07	-0.14
S. Esteban	4683	2416	25	2.0	7.5	0.16	(-1.03)
Sta. Catalina	4362	2251	24	1.7	8.2	0.18	-0.17
S. Isidoro	3947	2270	27	2.2	5.7	0.13	-0.24
S. Sebastián	3550	1890	23	2.2	5.2	0.14	-0.16

En las situaciones prácticas más usuales, es difícilmente asumible la hipótesis de campo difuso y, por tanto, la constancia del campo reverberado. Barron<sup>2</sup>, analiza el comportamiento del campo reverberado en un conjunto de salas polifuncionales, cuyo comportamiento no puede suponerse difuso, fundamentalmente, por la concentración de la absorción en la superficie de la audiencia, y sostiene que el campo reverberado se atenúa linealmente con la distancia a la fuente a razón de  $-1 \text{ dB}/10 \text{ m}$ . En la Tabla I algunas de las características significativas de las diez iglesias gótico-mudéjares mencionadas: volumen ( $V$ ), superficie interior ( $S$ ), distancia máxima fuente-receptor ( $d_{MAX}$ ), tiempo de reverberación ( $T$ ), radio crítico ( $r_c$ ), coeficiente medio de absorción ( $\alpha_M$ ), y atenuación del campo reverberado ( $m$ ).

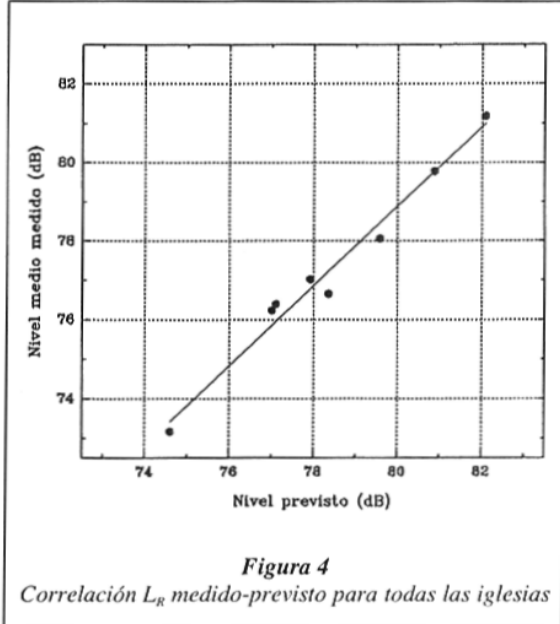
Tanto los valores de  $\alpha_M$  (que corresponden a la iglesia vacía), como los de  $r_c$ , sugieren que estos recintos podrían aproximarse mejor al modelo difuso que las salas analizadas por Barron, sin embargo, la forma y proporciones geométricas no son las más adecuadas para ello. En otros casos, ya se ha utilizado el modelo de Barron para evaluar la incidencia de una intervención mediante difusores de Schröder, precisamente en una iglesia<sup>3</sup>.

En este contexto, nos planteamos comparar los valores totales, medidos en las diferentes iglesias, con los previstos por el modelo clásico y los del modelo de Barron. Para ello se realizaron representaciones como las de la Fig. 2, correspondiente a la Iglesia de Sta. Catalina. En el eje de abscisas representamos la distancia fuente-receptor y en el de ordenadas los niveles referidos al nivel directo producido por la fuente omnidireccional a  $10 \text{ m}$ : medidos ( $\bullet$ ), previstos por la teoría clásica ( $—$ ) y previstos por el modelo de Barron ( $---$ ).



Encontramos que, en general, el modelo de Barron se adecuaba bien para predecir el comportamiento del campo acústico interior en este tipo de recintos. Con el fin de precisar más este comportamiento, nos planteamos estudiar la variación de  $L_R$  con mayor detalle. Para ello, en primer lugar, descartamos los puntos de medida situados en las naves laterales de las iglesias, pues como norma general, las dimensiones de las pilastras eran suficientes como para proyectar *sombra* acústica sobre esa zona, al ubicar la fuente en el altar. En este trabajo presentamos los resultados para los niveles globales, sin entrar en detalles relativos a la frecuencia.

A partir del valor de  $L_w$ ,  $T$ ,  $V$  y de la distancia fuente-receptor, se puede determinar el nivel directo y el reverberado previsto. Puesto que la fuente es omnidireccional y las distancias implicadas son relativamente cortas (ver Tabla I) como para tener que considerar la atenuación del sonido directo<sup>4</sup>, restando de la energía sonora total medida la debida al campo directo, se obtiene el nivel reverberado,  $L_{Rr}$ , correspondiente al valor medido en cada punto. Hemos intentado correlacionar linealmente estos valores con la distancia a la fuente, encontrándose un alto grado de correlación para todos los casos excepto dos, señalados entre paréntesis en la Tabla I, columna m, que recoge la pendiente de la recta de ajuste, es decir, la atenuación del campo reverberado con la distancia. El número de puntos por iglesia, en promedio, es de 7. En la figura 3 se muestra el ajuste correspondiente a la de Santa Catalina.



Finalmente, en la Fig. 4, hemos representado los valores de  $L_R$  previstos por la fórmula clásica, para cada iglesia, frente a los valores medios calculados a partir de las medidas *in situ*. Sobre esta misma representación se ha trazado la recta de correlación, en buena concordancia con los resultados de Barron, que obtiene una pendiente de 0.94 y una ordenada en el origen de -2 dB. La ecuación de la recta es:

$$L_R (\text{medido}) = 1.01 \times L_R (\text{previsto}) - 2.16 \text{ dB} \quad (r = 0.94)$$

### 3.- CONCLUSIONES

El análisis detallado del campo reverberante en el interior de las iglesias, ha puesto de manifiesto que los niveles acústicos correspondientes,  $L_R$ , se atenúan linealmente con la distancia a la fuente, con índices de atenuación que oscilan entre los -0.09 y los -0.37 dB/m, e índices de regresión mayores que 0.9 para las

rectas de regresión ajustadas. Sólo en dos casos los índices de correlación han sido menores y no se han tenido en cuenta.

En términos globales, los resultados indican que el valor medio de estas atenuaciones es de  $0.2 \text{ dB/m}$ ; ello significa que, en los puntos más alejados de las naves ( $d \approx 20 \text{ m}$ ), podrían darse atenuaciones de hasta  $4 \text{ dB}$ , lo que puede resultar poco deseable si pensamos que duplicar la potencia de la fuente supone un incremento de  $3 \text{ dB}$ .

Finalmente, al correlacionar linealmente los niveles previstos por la teoría clásica con los valores medios obtenidos a partir de los datos experimentales, hemos encontrado una pendiente muy próxima a la unidad y una ordenada en el origen de  $-2 \text{ dB}$ , con un índice de correlación mayor que  $0.94$ . Ello pone de manifiesto que el modelo clásico de campo difuso tiende a sobrevalorar en unos  $2 \text{ dB}$  los valores reales, por lo que es aconsejable utilizar el modelo modificado de Barron.

#### 4.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANGULO ÍÑIGUEZ, D., *Arquitectura mudéjar sevillana de los siglos XIII, XIV Y XV*. Servicio de publicaciones del Ayuntamiento de Sevilla, 1983, p. 32.
- [2] BARRON M. , LEE L.J.: Energy relations in concert Auditoriums. I. J. Acoust. Soc. Am. **84** (2), pp 618-828 (1988).
- [3] V. DESARNAULDS, G. MONAY: *Utilisation des diffuseurs de Schröder dans les salles polyvalentes a plafond haut*. Proc. 11th Int. FASE Symposium. Valencia, 15-17 November 1994.
- [4] T.J. SCHULTZ and B.G. WATERS: *Propagation of sound across audience seating*. J. Acoust Soc, Am. **36**, 885-896 (1964).