

## ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO ACÚSTICO EN LA CATEDRAL DE TOLEDO A PARTIR DE MEDIDAS EXPERIMENTALES

PACS: 43.55.Br

Fernández, Marta; Peiró, Antonio; Ruiz, Rogelio; Pedrero, Antonio; Díaz, César  
Grupo de investigación en Acústica Arquitectónica, ETS de Arquitectura  
Universidad Politécnica de Madrid  
Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid  
Tel: 913 364 249  
Fax: 913 366 554  
E-mail: [arquilav.arquitectura@upm.es](mailto:arquilav.arquitectura@upm.es)

### ABSTRACT

Churches are complex acoustic spaces which are composed of several smaller spaces. One of the consequences of this arrangement is the appearance of the acoustic coupling effect. It has been carried out the analysis of the energy decay curves obtained from *in situ* measurements performed inside the Toledo Cathedral in the spaces which are propitious to find the acoustic coupling phenomenon.

### RESUMEN

Las iglesias son espacios acústicos muy complejos conformados por subespacios de diferentes volúmenes. Una de las consecuencias de esta complejidad volumétrica es la aparición del fenómeno de acoplamiento acústico. A partir de medidas acústicas *in situ* realizadas en la Catedral de Toledo se ha llevado a cabo un análisis de las curvas de caída energética obtenidas experimentalmente en aquellos espacios que a priori son favorables a la aparición de dicho fenómeno acústico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de acoplamiento acústico se manifiesta en espacios compuestos por varios recintos conectados a través de una superficie que permite la transmisión de energía de unos a otros. Cuando la fuente sonora emite en uno de los espacios, la energía sonora pasa desde el recinto donde está colocada la fuente al segundo recinto, para posteriormente regresar. Esta transmisión de energía altera el campo sonoro de ambos recintos, provocando que las curvas de decrecimiento energético de dichos espacios estén caracterizadas por las propiedades geométricas y acústicas de ambos recintos, así como por el área de la abertura de acoplamiento. Son numerosos los ejemplos de espacios arquitectónicos conformados por una serie de volúmenes acoplados. En las iglesias es frecuente encontrar agrupaciones de este tipo, donde existen capillas laterales, el presbiterio o el coro, conectadas a las naves.

El acoplamiento acústico entre recintos fue investigado tanto experimental como teóricamente por Eyring. Posteriormente, el flujo de energía sonora entre dos recintos fue estudiado en detalle por Cremer y Muller [1], para el caso de recintos que estaban acoplados por una superficie de acoplamiento abierta o cuando dicha superficie tenía un coeficiente de transmisión menor que 1, como por ejemplo puertas, cortinas, etc. Más adelante, Kuttruff [2] discutió la teoría de acoplamiento acústico, ilustrándolo con un ejemplo de tres recintos acoplados en línea. Como ejemplos donde hay una clara evidencia del fenómeno de acoplamiento puede citarse la Catedral de San Pablo en Londres, o la Basílica de San Pedro en Roma. Las medidas experimentales llevadas a cabo en estos dos lugares por diferentes investigadores como J.S. Anderson y M. Bratios Anderson [3] o Francesco Martellota [4], así como el estudio teórico, han constatado la presencia de acoplamiento acústico.

En este trabajo se estudia el fenómeno de acoplamiento acústico a partir de las mediciones llevadas a cabo en el interior de la Catedral de Toledo, analizando las curvas de decrecimiento energético en distintas posiciones de fuente y receptor para los diferentes subespacios que componen la catedral. Se pretende verificar que en un recinto de las características de la Catedral de Toledo, pueden identificarse espacios con comportamientos acústicos diferentes, pero todos ellos influenciados por el acoplamiento con otros espacios.

El estudio se basa en medidas experimentales y no en cálculos teóricos debido a la dificultad de obtener ciertos parámetros, como la absorción acústica, de cada uno de los espacios individualmente.

## 2. MÉTODO DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Se han llevado a cabo mediciones acústicas en el interior de la catedral de Toledo en base a la norma *UNE-EN ISO 3382-1:2010* [5]. Se ha elegido el método de la respuesta impulsiva integrada. Como señal de excitación se ha utilizado el disparo de una pistola de fogeo. Las medidas se han realizado en diversos puntos del recinto y para distintas posiciones de fuente sonora, con el fin de caracterizar acústicamente cada uno de los subespacios que conforman la catedral. El software utilizado para la medición y obtención de los parámetros acústicos ha sido *Dirac 4.0*.

Para el estudio del acoplamiento acústico se han seleccionado aquellos espacios en los que, a priori, puede manifestarse dicho fenómeno: capillas laterales, coro, presbiterio y crucero. En la figura 1 se muestran las zonas elegidas para el análisis.

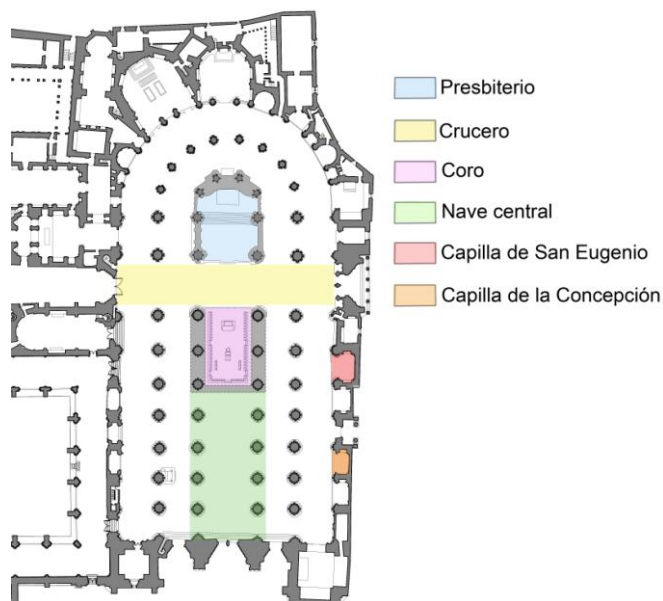


Figura 1 – Planta de la Catedral de Toledo con división de espacios

En cada uno de los espacios seleccionados, se han analizado las curvas de decrecimiento energético para una configuración representativa fuente-receptor, con el fin de estudiar su grado de linealidad de acuerdo a los parámetros definidos en el anexo B de la norma *UNE-EN ISO 3382-2:2008* [6],  $C$  y  $\xi$ .

El parámetro de curvatura,  $C$ , expresa la desviación en porcentaje entre los tiempos de reverberación  $T_{20}$  y  $T_{30}$ .

$$C = 100 \cdot \left( \frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right) \quad [\%]$$

Los valores de  $C$  entre 0% a 5% denotan linealidad en la curva de caída, mientras que valores por encima del 10% indican una curva de decrecimiento que está lejos de ser una línea recta.

El parámetro de no linealidad,  $\xi$ , se expresa como:

$$\xi = 1000 \cdot (1 - r^2) \quad [\text{‰}]$$

Siendo  $r$  el coeficiente de correlación lineal entre la recta de mejor ajuste y la curva de decrecimiento energético.

Los valores de  $\xi$  entre 0‰ a 5‰ denotan linealidad en la curva de caída, mientras que valores por encima del 10‰ indican una curva de decrecimiento que no puede asemejarse a una línea recta.

Los valores obtenidos de los parámetros  $C$  y  $\xi$  permiten determinar si la curva de decrecimiento tiene un grado de linealidad elevado, es decir, si puede aproximarse a una única recta, o por el contrario, existen tramos con diferentes pendientes de caída. El hecho de obtener una curva de decrecimiento no lineal puede ser indicativo de que existe acoplamiento acústico, pudiendo aproximarse en este caso a varias rectas.

Para identificar los distintos tramos en las curvas de decrecimiento energético no lineales en los espacios acoplados, se ha implementado una aplicación mediante el software *Matlab*, que se ha utilizado para calcular la pendiente de cada una de las rectas de regresión lineal a las que pueden aproximarse cada uno de dichos tramos.

El estudio por tramos de las diversas curvas de caída, permite establecer comparaciones entre los distintos espacios para evidenciar la existencia de acoplamiento acústico.



*Figura 2 – Vista del coro*



*Figura 3 – Vista aérea del presbiterio*

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el presente apartado se muestran, para cada uno de los espacios estudiados, las curvas de decrecimiento energético así como los valores obtenidos para frecuencias medias de  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  y los indicadores de no linealidad de dichas curvas.

#### **3.1. Nave central y crucero**

La nave central, junto con el crucero, representa el espacio de mayor volumen dentro de la catedral. Tanto gráfica como analíticamente – indicadores  $C$  y  $\xi$  inferiores a 5% y 5‰ respectivamente – se observa que el grado de linealidad de las curvas de caída en ambas localizaciones es elevado, lo que significa que pueden aproximarse a una única recta.

La curva de decrecimiento energético correspondiente a la nave central se ha obtenido ubicando la fuente sonora y el punto de recepción en dicha nave. En el caso del crucero, la fuente se ha ubicado en el púlpito y el punto de recepción en el espacio comprendido entre el coro y el presbiterio.

Tanto en la nave central como en el crucero, no se aprecia la existencia de acoplamiento acústico en los puntos de medida considerados, es decir, no se encuentran influenciados por la acústica de los subespacios que se conectan a ellos.

	F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>30</sub> (s)	C (%)	ξ (‰)
<b>Nave Central</b>	500	6,31	6,36	1	0
	1000	5,69	5,72	1	0
	2000	4,63	4,73	2	0
<b>Crucero</b>	500	6,23	6,29	1	0
	1000	5,42	5,54	2	1
	2000	4,28	4,39	3	1

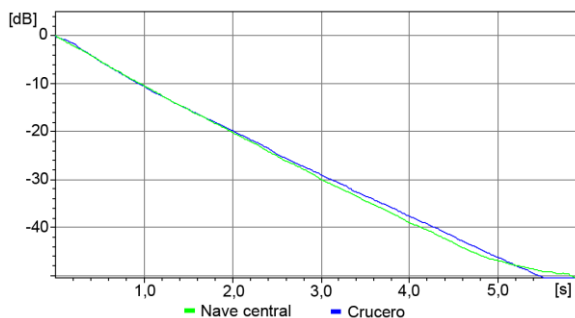


Tabla 1 – Valores de T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> e indicadores de no linealidad de curvas de caída energética de nave central y crucero

Figura 4 – Curvas de decaimiento energético de nave central y crucero

### 3.2. Capilla de la Concepción y Capilla de San Eugenio

Las capillas de la Concepción y de San Eugenio son pequeños espacios conectados a una de las naves laterales, cuyo volumen es muy inferior al de las naves. En este caso, al analizar los indicadores de no linealidad, C y ξ, se obtienen valores superiores al 5% y 5‰ respectivamente, lo que indica que las curvas de decaimiento energético no pueden ajustarse a una única recta, tal y como se observa en la figura 5.

	F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>30</sub> (s)	C (%)	ξ (‰)
<b>Capilla de la Concepción</b>	500	5,07	5,67	12	8
	1000	4,36	4,89	12	7
	2000	2,90	3,78	30	14
<b>Capilla de San Eugenio</b>	500	4,65	5,60	21	18
	1000	3,94	4,88	24	20
	2000	2,50	3,60	44	23

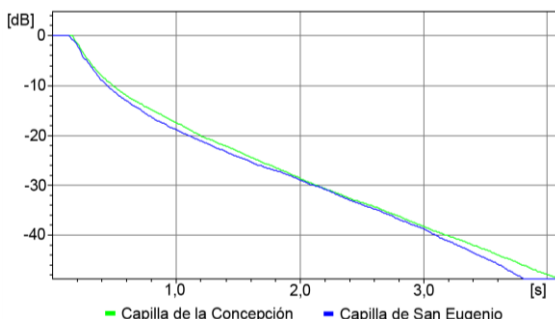


Tabla 2 – Valores de T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> e indicadores de no linealidad de curvas de caída energética de capillas de la Concepción y de San Eugenio

Figura 5 – Curvas de decaimiento energético de capillas de la Concepción y de San Eugenio

Los valores obtenidos en ambas capillas corresponden al análisis de las respuestas impulsivas obtenidas ubicando la fuente sonora en el interior de cada capilla y el punto de recepción en sus proximidades, en la nave lateral.

En ambas curvas pueden apreciarse dos tramos diferenciados que indican la presencia del fenómeno de acoplamiento acústico: una primera tasa de decaimiento mayor, que se corresponde con el comportamiento acústico del interior de dichas capillas; y una segunda tasa de decaimiento menos acusada que se asemeja a la de las naves.

### 3.3. Coro y presbiterio

El coro y el presbiterio son dos espacios conectados con las naves, de volumen superior al de las capillas y con una superficie de acoplamiento mayor.

En el caso del coro, los valores obtenidos de los parámetros  $C$  y  $\xi$  indican linealidad en su curva de decrecimiento para las bandas de 500 Hz y 1000 Hz, no siendo así para la banda de 2000 Hz – valores de  $C$  y  $\xi$  superiores al 5% y 5‰ respectivamente.

En el presbiterio, los indicadores de no linealidad  $C$  y  $\xi$  alcanzan valores superiores al 5% y 5‰, denotando un grado de no linealidad en la curva de caída mayor que en el coro.

Los resultados presentados para estos espacios corresponden al análisis de las respuestas impulsivas medidas ubicando tanto fuente como receptor dentro de cada uno de los subespacios.

	F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>30</sub> (s)	C (%)	$\xi$ (‰)
<b>Coro</b>	500	5,96	6,18	4	1
	1000	5,19	5,47	5	3
	2000	3,79	4,20	11	8
<b>Presbiterio</b>	500	5,22	5,72	10	6
	1000	4,52	5,06	12	7
	2000	3,26	3,73	15	10

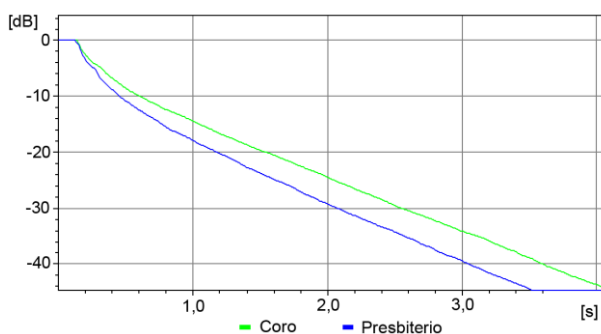


Tabla 3 – Valores de T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> e indicadores de no linealidad de curvas de caída energética de coro y presbiterio

Figura 6 – Curvas de decrecimiento energético de coro y presbiterio

Como se observa en la figura 6, el grado de acoplamiento acústico es mayor en el caso del presbiterio que en el del coro, ya que su tasa de decrecimiento en la parte inicial de la curva es mayor, pudiéndose distinguir claramente dos tramos de caída. Como el grado de linealidad es mayor en el caso del coro, no se aprecia de forma tan evidente la existencia de acoplamiento.

Las diferencias en uno y otro caso pueden deberse a su configuración geométrica, es decir, a la superficie de acoplamiento con respecto a las naves. El coro se encuentra conectado con ellas por medio de una superficie mayor que el presbiterio y su curva de decrecimiento se asemeja en mayor medida a la de las naves, estando menos influenciada por el comportamiento acústico del propio subespacio.

### 3.4. Análisis comparativo por espacios

A partir de las curvas de decrecimiento energético de cada uno de los espacios estudiados, se ha llevado a cabo un análisis de los distintos tramos, calculando la pendiente de la recta que mejor se ajusta a cada uno de los tramos de caída.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos por espacios.

	1º Tramo curva <i>m</i> (dB/s)	2º Tramo curva <i>m</i> (dB/s)
<b>Nave Central</b>	-10,4	-10,4
<b>Capilla de la Concepción</b>	-33,1	-10,8
<b>Capilla de San Eugenio</b>	-33,3	-10,2
<b>Crucero</b>	-10,3	-10,3
<b>Coro</b>	-21,5	-9,7
<b>Presbiterio</b>	-32,2	-10,9

Tabla 4 – Valores de la pendiente (*m*), por tramos, de las rectas de mejor ajuste de las curvas de decrecimiento energético de cada espacio

Como se observa, y se ha constatado en el análisis del grado de linealidad de las curvas, en los espacios en los que está presente el fenómeno de acoplamiento acústico y se han identificado dos tramos de caída, se obtienen valores de pendiente diferentes para cada tramo. Es el caso de las capillas, el coro y el presbiterio.

En la nave central y en el crucero, donde no se evidencia acoplamiento acústico, el valor de la pendiente de la recta a la que se asemeja la curva de decrecimiento es el mismo a lo largo de toda la caída energética.

En todos los espacios en los que se da el fenómeno de acoplamiento, el primer tramo de caída refleja el comportamiento acústico del espacio en cuestión (véase figura 7), mientras que el segundo tramo se encuentra influenciado por la acústica del espacio de mayor volumen de la catedral, es decir, por las naves. En este segundo tramo, y para todos los espacios, el valor de la pendiente de la recta que mejor se ajusta a la curva de decrecimiento energético, no difiere en más de 1 dB/s respecto del valor de la pendiente obtenido para las naves.

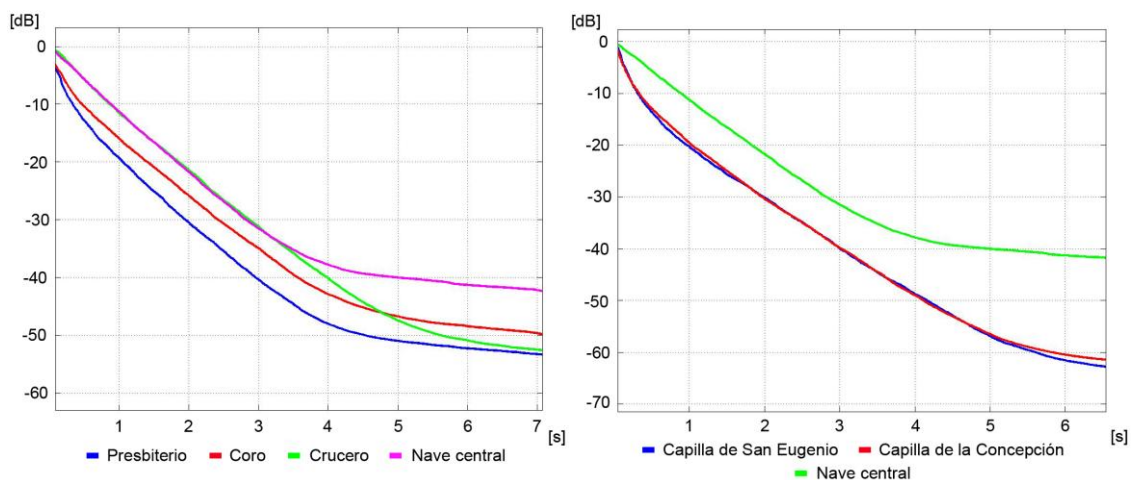


Figura 7 – Comparativa de curvas de decrecimiento energético de los distintos espacios estudiados

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis de las curvas de decrecimiento energético obtenidas en cada uno de los espacios estudiados de la Catedral de Toledo evidencia la existencia del fenómeno de acoplamiento acústico. A pesar de que cada uno de los subespacios que componen la catedral presenta un comportamiento determinado, dando lugar a diferentes ambientes acústicos, todos ellos están influenciados por las características acústicas de los espacios de mayor volumen, como son las naves. Como se ha visto, este hecho se ve reflejado en las curvas de decrecimiento energético, cuya parte final tiene un comportamiento similar - así lo demuestran los valores obtenidos de la pendiente de la recta de mejor ajuste de las curvas de caída en el segundo tramo - para todos los espacios acoplados.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] L. Cremer, H.A. Muller, "Principles and Applications of Rooms Acoustics", Vol.1, Applied Science, 1982.
- [2] H. Kuttruff, "Rooms Acoustics", 3rd ed. E & FN Spon, 1991
- [3] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson, "Acoustic coupling effects in St. Paul's Cathedral, London", J. Sound Vib. 236, 209-225, 2000.
- [4] F. Martellota, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome", J. Acoust. Soc. Am. 126, 1175-1186, 2009.
- [5] UNE-EN ISO 3382-1:2010 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- [6] UNE-EN ISO 3382-2:2008 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempos de reverberación en recintos ordinarios.