



¿SON VÁLIDOS LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN NORMALIZADOS EN LA SIMULACIÓN ACÚSTICA DE EDIFICIOS PATRIMONIALES?

Planells, Ana¹; Segura, Jaume¹; Cerdá, Salvador¹; Barba, Arturo¹; Cibrián, Rosa¹; Giménez, Alicia¹

¹Grupo de Investigación en Acústica Virtual Universitat Politècnica de València-Universitat de València.
Edificio 5D, Camino de Vera s/n 46022. Valencia-Spain.
(acusvirt@upv.es)

Resumen

Los coeficientes de absorción son un factor fundamental para la calibración acústica de los modelos virtuales. Su determinación constituye un problema en el caso de edificios patrimoniales ya que los materiales que los componen, en la mayoría de los casos, no se encuentran en los catálogos normalizados dada su antigüedad. Además, al tratarse de construcciones históricas el desgaste y el paso del tiempo pueden haber modificado sus propiedades acústicas lo que dificulta su equivalencia con los materiales actuales.

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados obtenidos en la simulación acústica de la Basílica de Santa María de Elche, sede del Misteri, al trabajar con coeficientes de absorción ensayados, con aquellos derivados de la utilización de coeficientes medidos “in situ”.

Palabras-clave: absorción, patrimonio, simulación, acústica virtual.

Abstract

Absorption coefficients are a fundamental part of acoustic model calibration. In the case of heritage buildings, it can be arduous to determine them because most of the materials found are not included in standard catalogs. Moreover, time and use may have changed its acoustic properties making difficult the equivalence with contemporary materials.

The aim of this study is to compare the results obtained in the acoustic simulation of the Basilica of Santa Maria de Elche, scene of the “Misteri”, when working with standard absorption coefficients to those derived from the use of coefficients measured “in situ”.

Keywords: absorption, heritage, simulation, virtual acoustics

PACS no. 43.55.Ka

1 Introducción

La Basílica de Santa María de Elche es conocida por ser el escenario de la representación del “Misteri d’Elx”, representación teatral de origen medieval declarada Obra Maestra del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO en 2001.

El templo actual es el cuarto levantado en el mismo lugar y fue construido entre los años 1672 y 1784. Se trata de un edificio con planta de cruz latina, una sola nave cubierta con bóveda de cañón y lunetos, y capillas laterales entre contrafuertes perforados que permiten la circulación entre ellas y las comunican con el transepto y deambulatorio, que envuelve el ábside cubierto por una semicúpula. El crucero se cubre con una gran cúpula con tambor sobre pechinas. La circulación perimetral se repite en la planta superior a través de la tribuna situada sobre las capillas y el deambulatorio en la que se abren balcones al espacio central y los balcones corridos del transepto, en uno de los cuales se sitúa el órgano.

En cuanto a los materiales, tanto los muros como los pilares y bóvedas de la nave, transepto y capillas son de piedra. Así como la cornisa, pilastras y demás elementos de ornamentación. La cúpula original de piedra fue sustituida en el año 1907 por otra más ligera de estructura metálica y plementería de ladrillo enfoscado con mortero de cemento [1]. El pavimento actual de mármol se colocó en 1947 ya que el original, también de piedra, se había visto muy afectado durante la Guerra Civil.



Figura 1 – Interior de la Basílica de Santa María de Elche

2 Simulación con coeficientes de absorción normalizados

2.1 Construcción del modelo

La primera parte del trabajo ha consistido en la construcción de un modelo de la Basílica, su posterior calibración a partir de los parámetros acústicos medidos y la simulación acústica. El modelo se ha levantado a partir de los planos existentes en dos fases, empleando el programa de diseño asistido por ordenador AutoCAD para crear una estructura alámbrica que posteriormente se ha cerrado con el software SketchUP.

Las superficies que configuran el modelo se han agrupado en capas en función de los materiales que representan. La figura 2 muestra el modelo resultante diferenciando por colores los diferentes materiales existentes.



Figura 2 – Modelo de la Basílica para la simulación acústica con los materiales diferenciados por colores.

2.2 Medida de parámetros acústicos

La toma de datos acústicos se ha realizado empleando dos fuentes fuente dodecaédricas DO12 (Rated power 600W, Sound Power >120dB, Rango de frecuencias: 80 Hz-6.3 kHz, directividad: casi esférica) que se han situado en el altar y en el centro de la cúpula respectivamente. Se han utilizado tres tipos de micrófonos. Los parámetros monoaurales se han medido con micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK (Sensitividad a 250Hz 50 mV/Pa, Rango de frecuencias: 3.15 Hz-20 kHz, Límite superior de rango dinámico (3% Distorsión): 164 dBre. 20 μ Pa, Límite inferior de rango dinámico: 14 dB, re. 20 μ Pa). Los parámetros espaciales con micrófono multipatrón AT4050/CM5 (rango de frecuencias: 20–20000 Hz, sensitividad: 15.8 mV, patrones polares: cardioide, omni direccional, figura-de-ocho) y su correspondiente fuente de alimentación phantom. Por último, la medida de los parámetros binaurales se ha realizado con una cabeza HMS III.0 (rango de frecuencias: 3 Hz-20 kHz, -3 dB/+0.1 dB; rango dinámico: typ. >118 dB, max SPL 145 dB). La adquisición y posterior cálculo de medidas se ha realizado con el software WinMLS.

Se han establecido dos posiciones de fuente y 36 posiciones de receptor distribuidas entre la nave central, las cuatro capillas del lado de la epístola y uno de los laterales del transepto tal y como se muestra en la figura 3. Se han estudiado los parámetros RT, EDT, Tc, C80, C50 y G [2].

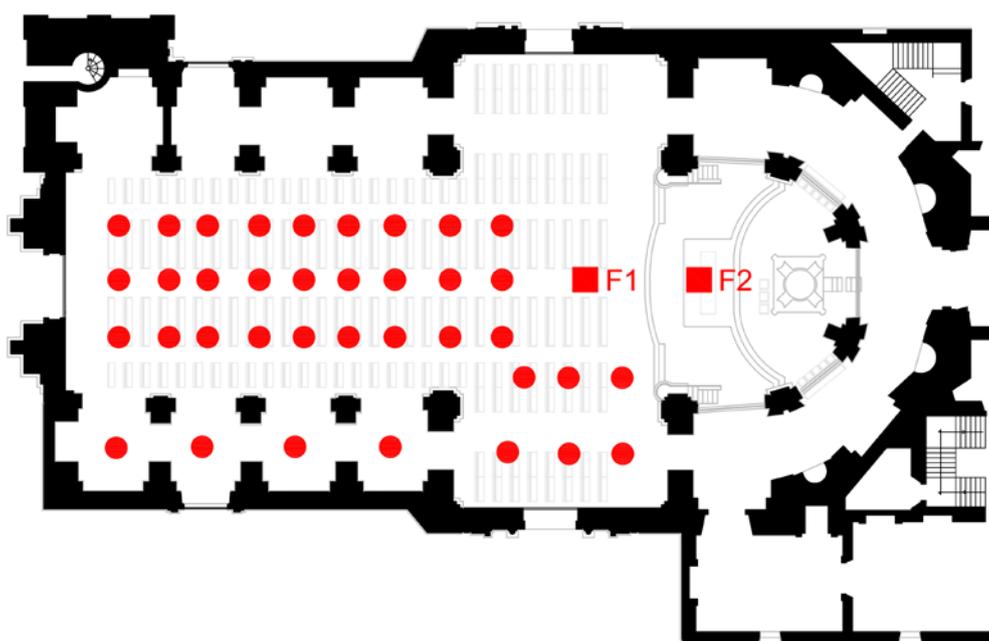


Figura 3 – Posiciones registradas en la medición de parámetros acústicos

2.3 Simulación

Se ha trabajado con el modelo correspondiente a la iglesia con la configuración propia de la celebración del culto que se ha exportado a CATT-Acoustics para proceder a la simulación acústica. Una vez exportado se ha realizado una primera fase de trabajo destinada a depurar el modelo y eliminar los errores que contenía y que impedían la simulación tales como planos coincidentes, bordes de planos que se cortan, planos alabeados o con las normales al revés.

Al modelo depurado se le han asignado las absorciones correspondientes a cada material y se ha procedido a la calibración. Los valores de absorción y dispersión de los materiales se han tomado de valores de catálogo [3] [4] [5] al no haber procesado todavía las medidas in situ y con el objetivo de comparar resultados en un futuro. A la hora de calibrar el modelo se han tomado como base el tiempo de reverberación medido y se han ido ajustando las absorciones del material “piedra” por ser el predominante y contar con un alto grado de incertidumbre ya que las referencias bibliográficas no incluyen valores propios de muros de piedra vista como los que constituyen la basílica.

Una vez ajustadas las absorciones de forma que las diferencias entre el T-30 medido y el dado por el software eran inferiores a un 5% se ha lanzado una primera simulación de cara a comparar el resto de parámetros de la sala. Ha sido necesario reajustar los valores tanto de absorción de la piedra como de difusión para conseguir diferencias aceptables entre los valores medidos y simulados en el resto de parámetros siendo el relativo a la claridad de palabra C-50 el más conflictivo. Tras un proceso iterativo de modificación de los valores de absorción y comparación de los valores medidos y simulados, se ha ajustado el modelo obteniendo diferencias inferiores a 2 JND.



Tabla 1. Materiales y coeficientes de absorción (arriba) y dispersión (abajo) empleados en la simulación

Material	Área %	Coeficientes utilizados					
		125	250	500	1000	2000	4000
Fábrica de piedra	67.4	0.038	0.038	0.04	0.048	0.05	0.028
		0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
Bóvedas	12.7	0.038	0.038	0.04	0.048	0.05	0.028
		0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40
Mármol pavimento	7.9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
		0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
Cúpula	2.6	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06
		0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40
Bancos	5.1	0.09	0.14	0.16	0.16	0.15	0.13
		0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.70
Vidrio	1	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Retablo	0.9	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
		0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40
Pechinas	0.8	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06
		0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.70
Órgano	0.8	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16
		0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40
Mármol Rojo	0.7	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Madera	0.6	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
		0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
Altar	0.1	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
		0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17

El proceso descrito se ha realizado considerando la fuente situada en el altar, una de las dos posiciones en las que se tomaron medidas. Una vez ajustados todos los parámetros se ha llevado a cabo una simulación con la otra posición de fuente medida, en el centro de la cúpula, a modo de comprobación. La tabla 2 recoge los valores promedio T30 medidos y simulados por banda de octava para el caso de la fuente situada en el altar.

Tabla 2. Comparativa valores promedio T30 medidos y simulados con la fuente en el altar

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 Medido (dB)	7.48	7.13	6.68	5.98	4.81	3.54
T30 simulado (dB)	7.57	7.27	6.85	5.94	4.83	3.46
Diferencia (dB)	0.09	0.14	0.17	0.04	0.02	0.08
JND (5%)	0.37	0.36	0.33	0.30	0.24	0.18

3 Medición de coeficientes de absorción in situ.

3.1 Procedimiento

Paralelamente se ha realizado una campaña de medición de los coeficientes de absorción de los materiales presentes en la Basílica. Para este trabajo se han estudiado los resultados obtenidos para los dos materiales predominantes que son la fábrica de piedra y el pavimento de la nave. Se han registrado un total de 30 posiciones. Siguiendo el protocolo establecido en trabajos anteriores [6], cada medida se ha repetido tres veces. La figura 3 muestra los puntos en los que se han tomado las medidas de los coeficientes de absorción.

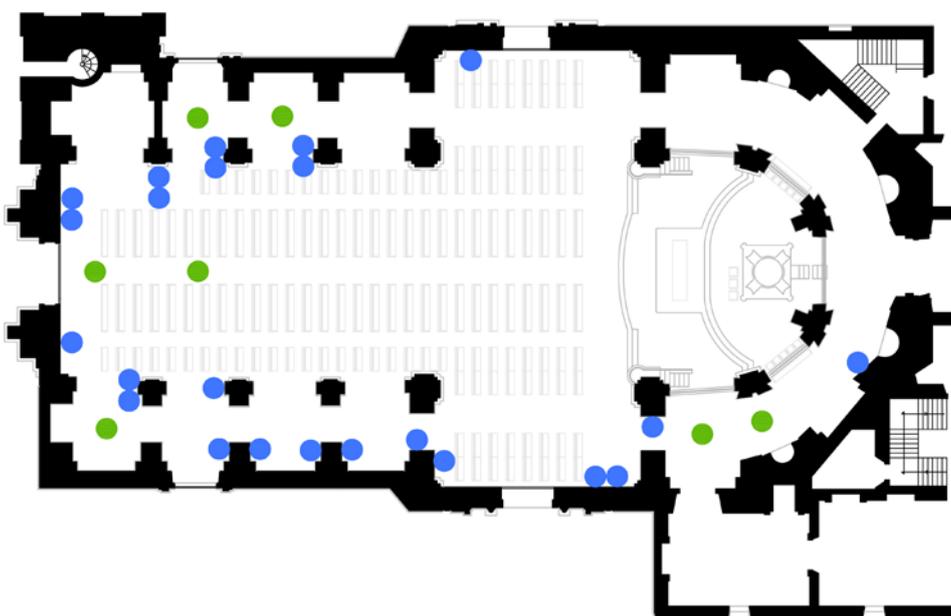


Figura 3 – Puntos de medida de los coeficientes de absorción. Se muestran en verde las medidas registradas en el pavimento y en azul las tomadas en la piedra.

La toma de datos se ha realizado con una pistola de impedancia de Microflown. El equipo cuenta con una fuente esférica situada a unos 23 cm de una sonda con sensores de presión y velocidad. La sonda se ha situado a unos 5 mm. de la muestra a medir, perfectamente perpendicular a ella y totalmente estática. Se han utilizado la señal sweep y se ha muestreado a frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. El equipo lleva asociado un programa informático que ofrece directamente el valor de los coeficientes de absorción. La figura 4 y las tablas 3 y 4 muestran los resultados obtenidos en la campaña de medidas y una comparativa de los mismos con los valores empleados en la simulación.

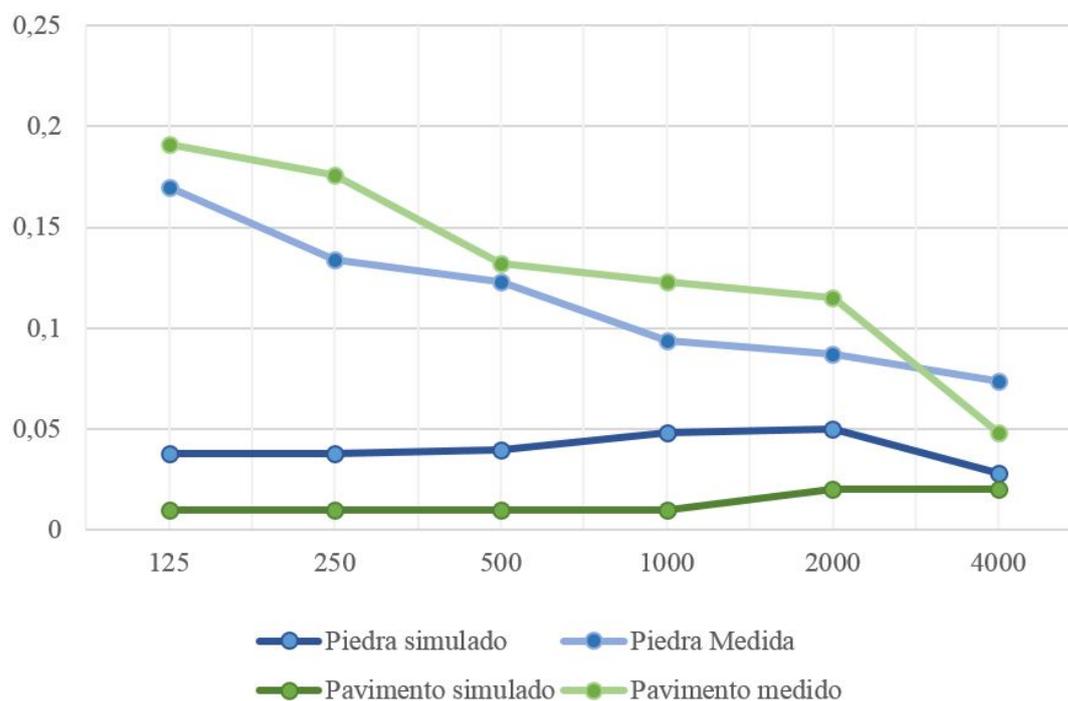


Figura 4. Valores medios de absorción medidos y empleados en la simulación por bandas de octava

Tabla 3. Comparativa valores medios absorción medidos y empleados en la simulación para la fábrica.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Abs. simulación	0.038	0.038	0.04	0.048	0.05	0.028
Abs. Medida	0.170	0.134	0.123	0.094	0.087	0.074
Diferencia	-0.132	-0.096	-0.083	-0.046	-0.037	-0.046

Tabla 4. Comparativa valores absorción medidos y empleados en la simulación para el pavimento de mármol.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Abs. simulación	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Abs. Medida	0.191	0.176	0.132	0.123	0.115	0.048
Diferencia	-0.181	-0.166	0.01	-0.122	-0.095	-0.028

En ambos casos los coeficientes de absorción medidos son considerablemente superiores a los normalizados y empleados en la calibración y simulación inicial. Más allá de las diferencias cuantitativas destaca el hecho de que los resultados de las medidas in situ muestran que el pavimento de mármol es más absorbente que la fábrica de piedra, mientras que en la hipótesis empleada en la simulación es al contrario.

El uso de los coeficientes de absorción medios de las medidas in situ en la simulación aportaría unos tiempos de reverberación muy inferiores a los reales por lo que será necesario un estudio más profundo de los materiales ya que, como muestra la figura 5, las absorciones medidas varían ampliamente de unos puntos a otros, por lo que no se puede establecer un valor medio para el conjunto del material.

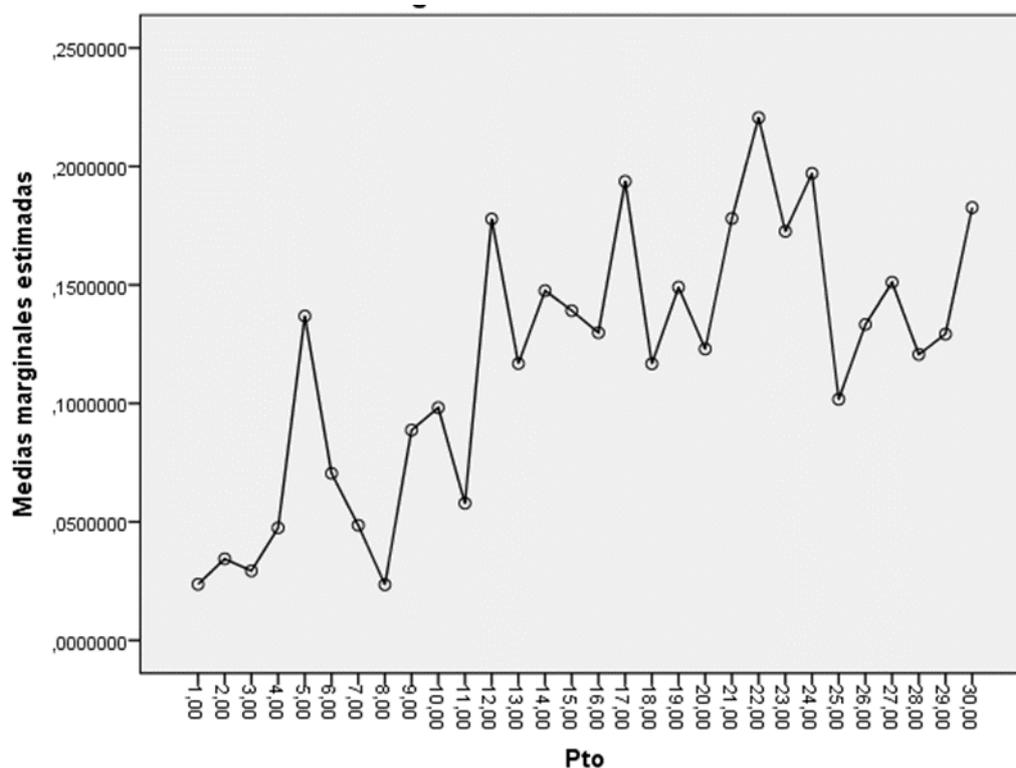


Figura 5. Valores medios de absorción por puntos de medida

Por otra parte, en la campaña de medidas de absorción no se tuvo acceso a las bóvedas. La superficie de bóvedas en el modelo es considerable y no se produce el desgaste que sufren las fábricas accesibles a los visitantes por lo que la absorción en estas zonas podría variar notablemente.

Conclusiones

En el caso de edificios patrimoniales los coeficientes de absorción normalizados difieren notablemente de los medidos in situ lo que puede comprometer los resultados obtenidos en la simulación aunque aparentemente el modelo se encuentre correctamente calibrado.

Los materiales que componen estos espacios no son homogéneos por lo que es necesario realizar un estudio detallado de los mismos, clasificar los resultados obtenidos en función de la posición del punto medido y establecer zonas con características similares que permitan realizar una hipótesis más ajustada a la realidad.



Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación BIA2012-36896. Agradecemos al Patronato Nacional del Misteri d'Elx, a los cantores y los responsables de la Basílica de Santa María su colaboración.

Referencias

- [1] Serrano, A. *Memoria del Proyecto de Restauración de la Iglesia de Santa María de Elche*. 1940.
- [2] Planells, A.; Segura, J.; Cerdá, S.; Barba, A.; Cibrian, R.; Giménez, A. *Acústica virtual patrimonial: aplicación a la auralización del Misteri d'Elx*. Proceedings del 46º Congreso Español de Acústica, 9º Congreso Ibérico de Acústica y Simposio Europeo sobre Acústica Virtual y Ambisonics, pp. 1523-1530. Valencia, España. Octubre 2015.
- [3] Álvarez-Morales, L.; Zamarreño, T.; Girón, S.; Galindo, M. *A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga*. Building and Environment 72, pp. 102-11.
- [4] Cox, T.J.; D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Spon Press, (2004).
- [5] Vorländer, M. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Springer-Verlag, Berlin (2008).
- [6] Pérez, C.; Cerdá, S.; Montell, R.; Cibrián, R.; Segura, J.; Barba, A.; Querol, L.; Giménez, A. *Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad*. Proceedings del 44º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica y Simposio Europeo de Acústica Ambiental y Mapas de Ruido, pp. 1366-1374. Valladolid, España. Octubre 2013.