

ACÚSTICA VIRTUAL DE LA CAPILLA DEL PALACIO DE SAN TELMO DE SEVILLA

PACS: 43.55.Ka

E. Alberdi; M. Galindo; A.L. León

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, España, Tel: +34 954 556 595, Fax: +34 954 557 018, E-mails: ealberdi@us.es; mgalindo@us.es; leonr@us.es

ABSTRACT

The chapel of San Telmo's Palace is a clear example of Spanish baroque architecture, specifically from the Seville Baroque architecture, designed by the master Leonardo de Figueroa (1670-1730), whose main works are developed in the city of Seville. In this paper the results of the simulation of the sound field are presented in this enclosure. Nowadays the chapel is deconsecrated and is the venue for concert series and representative and cultural events. The virtual acoustics allows us to evaluate different sound sources, their locations and the occupancy rate.

RESUMEN

La capilla del Palacio de San Telmo es un ejemplo claro de la arquitectura barroca española, más concretamente de la arquitectura barroca sevillana, obra del maestro Leonardo de Figueroa (1670-1730), cuyas obras principales se desarrollan en la ciudad de Sevilla. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del campo sonoro de este recinto. Dado que actualmente la capilla se encuentra desacralizada, el uso de la misma acoge ciclos de conciertos y actos representativos y de contenido cultural. La acústica virtual nos permite evaluar diferentes fuentes sonoras, sus localizaciones y el grado de ocupación.

LA CAPILLA DEL PALACIO DE SAN TELMO

En general puede decirse que las iglesias barrocas suponen mejoras en las condiciones acústicas frente a las anteriores iglesias renacentistas por varios motivos entre los que cabe destacar un menor volumen, una mayor ornamentación tanto de carácter permanente como efímera y la presencia de capillas laterales [1], [2].

La capilla del palacio de San Telmo es una obra de marcado carácter barroco, que el maestro Leonardo de Figueroa desarrolla en su etapa de mayor madurez, dentro del contexto de su intervención en el proceso de las obras sobre dicho palacio, entre los años 1721 y 1724.

La figura de Leonardo de Figueroa es fundamental para conocer el barroco andaluz y más concretamente el barroco sevillano, de la que fue maestro transcendental, tanto por el gran número de intervenciones como por la calidad de las mismas. En sus obras Leonardo de Figueroa desarrolla un lenguaje muy particular adaptando toda la ornamentación propia del barroco a los materiales y sistemas constructivos existentes en su ámbito de trabajo desarrollando en sus obras el empleo de ladrillo avitolado con la práctica eliminación de juntas verticales e intensificando las horizontales, así como, la aplicación de cerámica policromada en remates de cúpulas, tejados, espadañas, campanarios y capiteles.

Los orígenes del palacio de San Telmo datan del año 1681, cuando bajo el auspicio de la Corona se funda el colegio seminario para niños huérfanos con el objetivo de enseñarles el oficio de la marinería. En 1682 se inicia la construcción a las afueras de la ciudad bajo la dirección del maestro Antonio Rodríguez hasta el año 1713 cuando fallece quedando las obras paralizadas. Tras un periodo de inactividad Leonardo de Figueroa se hace cargo de las obras entre los años 1721 y 1724, cambiando el eje central del edificio formado por la portada, el zaguan, el claustro principal y la capilla.



Figura 1. Imágenes interiores de la nave de la capilla. Vista sup. izqda. desde el acceso principal hacia el altar. Vista sup. dcha. desde el acceso principal hacia el altar. Ubicación de las sillas tapizadas y el piano. Vista izq. inf. desde el altar hacia el coro y dcha. inf. Camarín tras el altar.

Dicha capilla está formada por una única nave con bóvedas de cañón y lunetos, manteniendo una configuración ya repetida en obras anteriores con ligeras variaciones como lo son el uso de pilastras corintias enmarcando los cuatro retablos y los dos cuadros en alzados laterales.

Los accesos se realizan desde los pies de la nave a través de un cancel de madera que comunica con el claustro del palacio y bajo la posición del coro. Por otra parte, destaca como particularidad la conexión de la capilla a través de balcones laterales en la planta primera del palacio, así como puertas laterales en el altar (ver Figura 1).

Entre los retablos cobra especial relevancia el principal de madera policromada ocupando gran parte de la superficie de la cabecera, que cuenta con un camarín, destacando en el mismo la

cúpula de su recinto alto de configuración ondulada, siendo este elemento una singularidad en la arquitectura barroca sevillana. Actualmente la capilla no cuenta con asientos fijos, sino con unas sillas tapizadas que se colocan para la celebración de los actos institucionales y conciertos para lo que también se cuenta con un piano que se coloca próximo al altar.

La actual configuración de la capilla se mantiene fiel a la original tanto en su configuración arquitectónica como en las obras de arte que aloja gracias a la labor del IAPH (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico) que entre los años 2005 y 2010 lleva a cabo un proceso integral de rehabilitación [3] [4].

MEDICIÓN ACÚSTICA *IN SITU*

Se realiza la medición de los parámetros acústicos de la capilla siguiendo el procedimiento que se indica en la normativa UNE-EN-ISO-3382-1:2010. [5] con el recinto vacío de ocupantes y tanto con las sillas tapizadas como con el piano que se coloca para los actos institucionales. Se realizan las medidas para las fuentes ubicadas en las dos posiciones que se consideran más significativas, el altar y el coro ambas a 1.50 m de altura simulando la altura del orador. Por otra parte, los receptores son distribuidos de manera homogénea en el recinto de la capilla en las posiciones de las sillas existentes a 1.20 m sobre el nivel del suelo y considerando la simetría existente en la configuración de la sala con respecto a las fuentes. Se monitorizan las condiciones ambientales durante el periodo de medida, manteniéndose constantes tanto la temperatura en 22.4 °C como la humedad relativa al 56%. Se establece una posición para el receptor (R7) que permite verificar el comportamiento simétrico de la sala en cuanto a su acústica. El espectro del ruido de fondo se registró durante cuatro minutos en el punto del receptor R3, que dio lugar a un índice NR de 30. La posición de fuentes y receptores pueden apreciarse en las plantas dispuestas en la figura 2.

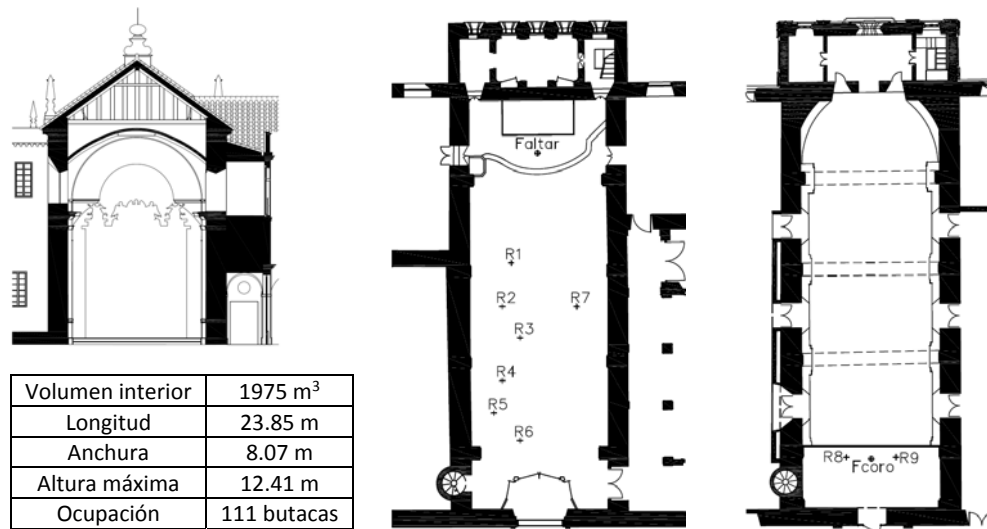


Figura 2. Sección transversal (izqda.), planta baja (centro) y alta (drcha.) de la capilla del Palacio de San Telmo. Posición de fuentes (F) y receptores (R) para medición *in situ* y datos geométricos y de aforo.

En cada receptor obtenemos respuesta al impulso (RI) a partir de barridos de señales de ondas sinusoidales incrementándose exponencialmente con el tiempo la frecuencia. El rango de frecuencia y la duración de cada barrido se ajustan para adaptarse a las condiciones del entorno, de manera que la relación señal/ruido impulsiva supere los 45dB en todas las bandas de octavas analizadas desde 63 a 16000 Hz. Es a partir de estas RI de donde se derivan los distintos parámetros acústicos que se analizan.

El proceso de generación de la señal, registro de la respuesta y análisis de la misma se ha realizado mediante el sistema WinMLS2004 sobre una tarjeta de sonido Edirol UA 101 de Roland. La señal generada alimenta al amplificador de potencia Beringher Eurolive B1800D-Pro y se reproduce en la capilla por una fuente omnidireccional AVM D012 de 01dB.

Para las RI se utilizan un micrófono multipatrón AT4050 de Audio-Technica con configuración omnidireccional conectado a fuente de polarización Soundfield (SMP 200). Para la obtención de los parámetros relacionados con la impresión espacial se utiliza el mismo micrófono multipatrón AT4050 de Audio-Technica tomando la posición del patrón de directividad en figura de ocho, conectando a la fuente de polarización Soundfield (SMP 200). Los parámetros relacionados con la impresión espacial se miden utilizando el simulador de torso HMS III de

Head Acoustic, junto con el acondicionador de señal B&K 2829. Por último el ruido de fondo se registra empleando un micrófono B&K 4165 de Bruel & Kjaer conectado al analizador de ruido SVAN 958 de SVantek.

SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO

En primer lugar se procede a la elaboración de un modelo tridimensional del interior de la capilla empleando el programa SketchUp 2014. Este modelo es exportado desde el programa de simulación acústica CATT- Acoustic, desarrollado por la empresa CATT (*Computer Aided Theatre Technique*) de Gothenburg (Suecia), con dos motores de cálculo diferentes: *CATT-Acoustic v.9.0c* y *TUCT v1.1ª*. El programa *CATT-Acoustic v.9.0c* es donde se genera la geometría del recinto, donde se asignan los coeficientes de absorción y dispersión de las superficies que revisten la capilla y se definen las posiciones y características de las fuentes y los receptores de manera que tanto unos como otros sean coincidentes con los considerados para las mediciones *in situ*, con variaciones en cuanto a las distancias entre emisor y receptor inferiores a 20 cm. En la medición *in situ* se consideran únicamente nueve receptores, ampliando a catorce para el modelo ya que se introducen nuevos en los puntos que mantenían simetría con los medidos con respecto a las fuentes y al eje principal de la capilla. Para la fuente situada en el coro se eliminan en el modelo los receptores 5, 6, 13 y 14 por no contar estos con sonido directo desde la fuente, aspecto también considerado en la medición *in situ*.

Por último, se introducen las condiciones ambientales medidas en los ensayos de campo, en concreto una temperatura de 22.4°C, humedad relativa del 56% y densidad del aire de 1.15 kg/m³. Se considera para el cálculo los valores para cada banda de octava del ruido de fondo medido *in situ*. El modelo del recinto, con un volumen de 1.975 m³, estaba compuesto por un total de 366 planos, que constituyen una superficie de revestimientos de 1.186,80 m³.

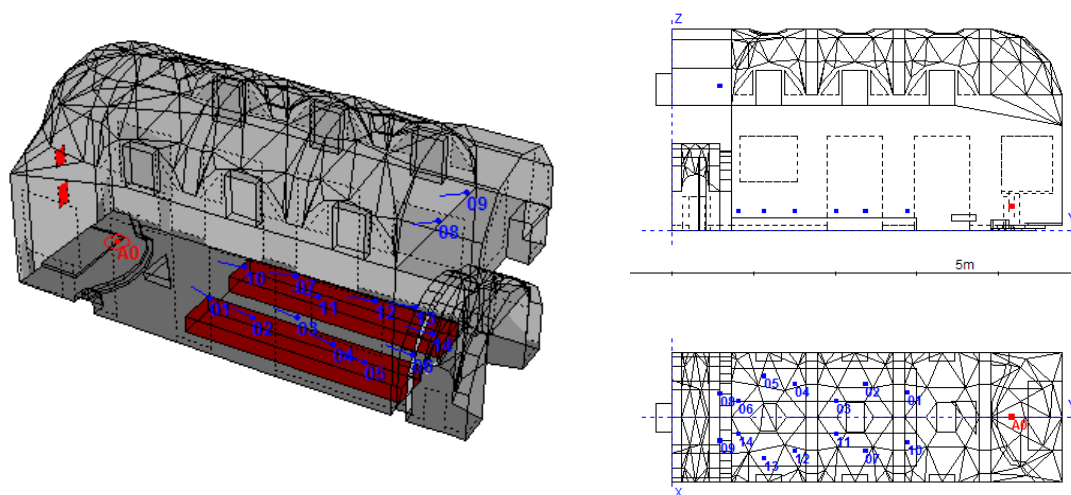


Figura 3. Modelo tridimensional Capilla del palacio de San Telr. Imagen izq. Motor TUCT e imagen drcha. CATT-Acoustic v9.0c.

res.

Una vez introducidos los datos CATT-Acoustic exporta los datos a un fichero (*.CAG) que usará el motor de cálculo *TUCT*. Se ha optado por el cálculo del algoritmo 2 donde el sonido directo y las reflexiones especulares de primer orden son siempre tratados de un modo determinista, no utilizando técnicas de trazados de rayos. Las reflexiones difusas de primer orden se tratan de igual forma, para lo que introduce un proceso aleatorio de división de rayos (*random Split-up*) estudiando en función de la frecuencia el sonido reflejado de manera difusa.

Se han considerado para el cálculo realizado con el motor CATT TUCT v1.1.a los siguientes parámetros de cálculo:

- Algoritmo de cálculo: 2, cálculo completo.

- Número de rayos/conos: 25.536
- Ecograma / respuesta al impulso: 1805,8 ms
- Absorción del aire: activada
- Difracción: activada
- Tiempo de cálculo: 4 horas, 36 minutos

VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez introducidos los datos del modelo en el programa de cálculo, con el fin de asegurar que el comportamiento del modelo se asemeja al real, es necesario validarlo para ajustar los resultados obtenidos en la medición *in situ*, de manera que su comportamiento sea muy similar al que posee realmente el espacio eclesial. Para obtener este objetivo es necesario modificar los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales, especialmente de aquellos que presentan mayor incertidumbre. Este ajuste se realiza para el tiempo de reverberación (T_{30}) simulado con los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava. Como criterio de validación se estima que la coincidencia es adecuada si estos difieren menos del 5% de los valores medidos en cada banda de octava, que corresponde al umbral perceptible, Just Noticeable Difference (JND), [6]

Tabla 1. Coeficientes de absorción sonora (α arriba) y coeficientes de difusión sonora (s abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
MÁRMOL [8]	1	1	1	1	2	2
	10	10	10	10	10	10
HUECO (Camarín)	99	99	99	99	99	99
	1	1	1	1	1	1
PUERTA MADERA [8]	14	10	6	8	10	10
	10	10	10	10	10	10
VIDRIERAS [8]	4	4	3	3	2	2
	10	10	10	10	10	10
RETABLO [9]	12	12	15	15	18	18
	30	40	50	60	70	80
REVOCO DE CAL(*)	22	21	17	14	13	10
	10	10	10	10	10	10
SILLA TAPIZADAS VACÍAS [8]	10	20	25	30	35	35
	30	40	50	60	70	80
SILLA TAPIZADAS OCUPADAS [8]	70	76	81	84	84	81
	30	40	50	60	70	80
LIENZO [10]	1	1	1	10	20	45
	10	10	10	10	10	10
CELOSÍA DE MADERA [11]	20	15	12	10	10	10
	10	10	10	10	10	10

* Material modificado.

El ajuste se ha realizado calculando el tiempo de reverberación con el motor de cálculo CATT TUCT v1.1a hasta obtener tiempos de reverberación similares a los medidos *in situ* con la capilla vacía y la fuente ubicada en el altar. A este respecto hay que indicar que en las mediciones realizadas se obtuvieron mayores tiempos de reverberación (T_{30}) con la fuente situada en el coro frente a la fuente ubicada en el altar [7], debido a los huecos que presenta el altar mayor y que conecta con el camarín. Es por este motivo por lo que se decide realizar el ajuste del modelo con la fuente situada en el altar analizando posteriormente la posición de la fuente en el coro y verificando la idoneidad de los resultados para ambas fuentes.

A los distintos materiales que configuran la capilla se le asignan coeficientes de absorción y dispersión teniendo en cuenta los valores que se reflejan en la literatura específica. Se parten de estos materiales procediendo para el ajuste del modelo a la modificación de los coeficientes de absorción para aquellos que presentan mayor incertidumbre. En concreto se opta por validar el modelo modificando los coeficientes de absorción para el “revoco de cal”, ya que representa el mayor porcentaje de superficie (53.5%) y cuya composición del paquete constructivo es en

menor medida asimilable a materiales existentes. Para el resto de materiales, tales como el mármol, las sillas tapizadas, los vidrios, madera y altares se consideran los valores de la bibliografía, siendo todas estas superficies notablemente inferiores a la del revoco de cal. Con respecto a los coeficientes de dispersión de los materiales, se opta por considerar dispersiones por defecto del 10% salvo para el hueco de comunicación con el camarín tras el altar, los retablos y las sillas tapizadas. Se ha analizado las posibles variaciones del valor por defecto determinando que no supone variaciones significativas en los resultados obtenidos en los distintos parámetros de sala analizados. Los coeficientes de absorción y dispersión utilizados se reflejan en la Tabla 1 para la fuente situada en el altar.

El modelo, una vez validado, se ha estudiado considerando las sillas ocupadas al 100% (Tabla 1) con el objetivo de conocer la influencia de la ocupación del recinto.

RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para los distintos parámetros acústicos que definen las características subjetivas del recinto, contrastando los resultados a partir de la modelización, con la RI que se obtiene en la medición *in situ* realizada previamente.

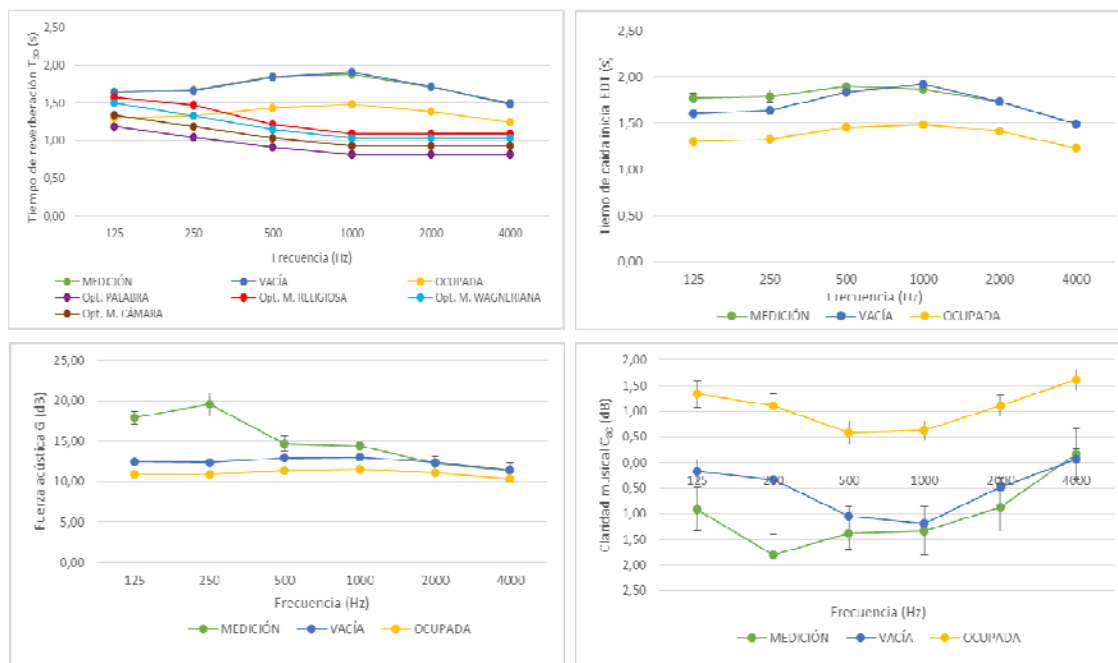


Figura 4. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el altar. Tiempo de reverberación (T_{30}), Tiempo de reverberación inicial (EDT), Fuerza Acústica (G), Claridad musical (C_{80}).

En la figura 4 se muestran los valores de varios parámetros monoaurales frente a la frecuencia, junto los errores estándar, con la fuente ubicada en el altar. Para el tiempo de reverberación T_{30} se comparan los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en la medición *in situ* con los simulados para la capilla vacía obteniendo diferencias en todas las bandas de frecuencias entre el 0% y el 2%, inferiores al JND para validar el modelo. Por otra parte en el modelo realizado se introduce la posibilidad de considerar las sillas ocupadas, disminuyendo el tiempo de reverberación en torno a 0.30-0.40 s y por tanto aproximándose en mejor medida a los valores que se consideran óptimos para distintos tipos de música y para la palabra, especialmente en las bajas y altas frecuencias.

Los resultados obtenidos con el modelo calibrado para el resto de parámetros de sala presentan diferencias inferiores a 2 JND con respecto a los valores medidos en cada banda de

octava. En la gran mayoría de los casos esta diferencia es menor que un JND, con peores resultados a bajas frecuencias, que ocasionalmente superan los dos JND. No obstante, es necesario considerar que el algoritmo de cálculo que utiliza el programa presenta limitaciones a frecuencias inferiores a $4f_s$, siendo f_s la frecuencia de Schröder. El valor de la misma para las condiciones de reverberación y volumen de la capilla es de 62.03 por lo que las limitaciones en cuanto a la valoración de los resultados son más fiables a partir de los 250 Hz, donde se observan los mejores ajustes.

En la figura 5 se representan los valores de J_{LF} que hacen referencia al ancho aparente de la fuente y parámetros binaurales, superando los valores de 2JND en las bandas de octavas analizadas, no así para los valores de $IACC_E$, donde es inferior a 2JND en todas las bandas superiores a 250 Hz salvo para las altas frecuencias a 4000 Hz.

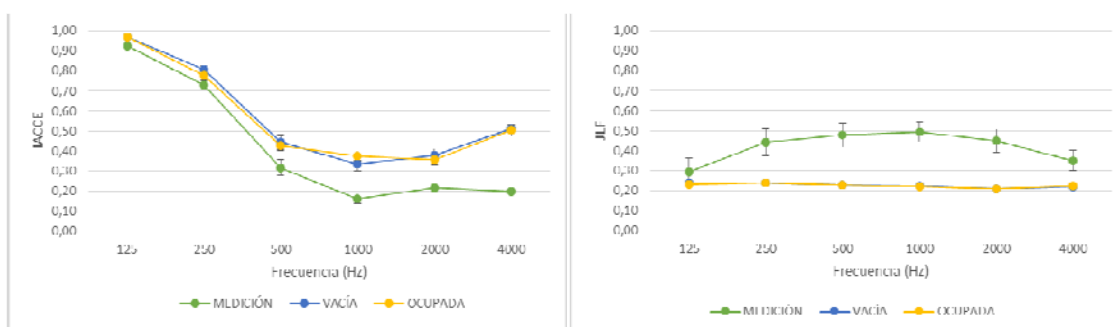


Figura 5. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el altar. Coeficiente de correlación cruzada interaural temprana ($IACC_E$), Energía Lateral precoz (J_{LF}).

Los valores del coeficiente de absorción obtenidos para el “revoco de cal” distan mucho de los esperados para un verdadero revoco de cal, muy poco absorbente a todas las frecuencias, si bien es verdad que se desconocen los tratamientos realizados sobre el material en el proceso de rehabilitación, que además presentan frescos sobre algunas zonas. Este aumento considerable de la absorción puede explicar las grandes diferencias encontradas en la Energía lateral precoz.

FUENTE SONORA EN EL CORO

Una vez realizada la validación del modelo se ha procedido a verificar los resultados que se obtienen con la fuente situada en el coro y modificando los coeficientes de absorción para el revoco de cal hasta garantizar un cumplimiento en los ajustes del T_{30} con variaciones al 5%, como se propone para la fuente en el altar. Se utilizan los mismos coeficientes salvo para el revoco de cal que quedan ligeramente modificados como se recoge en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de absorción sonora (α arriba) y coeficientes de difusión sonora (s abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
REVOCO DE CAL(*)	19	18	15	12	10	6
	10	10	10	10	10	10

* Materiales modificados.

En la figura 6 se representan los tiempos de reverberación ajustados en el modelo realizado con la fuente situada en el coro. Para este caso ha sido necesario disminuir ligeramente los coeficientes de absorción correspondientes a la fuente del altar, ya que como se observó en las mediciones *in situ* los tiempos de reverberación en este punto son ligeramente superiores a los obtenidos con la fuente en el altar. Para los valores considerados los tiempos de reverberación se ajustan en todas las bandas por debajo del 5%, en torno al 3-4% por lo que el modelo se considera adecuadamente validado.

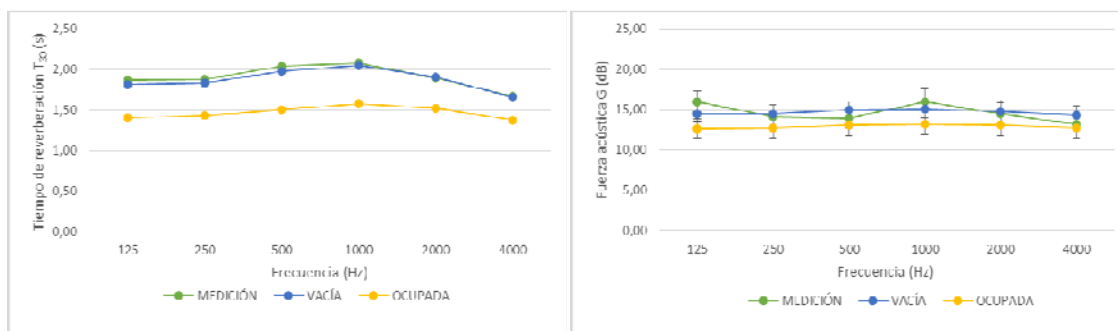


Figura 6. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el coro. Tiempo de Reverberación T₃₀, Fuerza Acústica G.

CONCLUSIONES

El método de validación del modelo a partir de los medidos del tiempo de reverberación permite recrear el ambiente sonoro, pese a las limitaciones en frecuencia e incertidumbres acústicas de los materiales y del recinto.

Por este motivo, los valores obtenidos en el ajuste de los coeficientes de absorción y dispersión, no siempre deben ser los correspondientes al material ejecutado in situ.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al estudio de Vázquez Consuegra su colaboración por los planos de la capilla y a la Institución del Palacio de San Telmo por el acceso para las medidas.

REFERENCIAS

- [1] Cirillo, E. y Martellotta, F. *Worship, acoustics and architecture*. Brentwood, Essex: Multi-Science Publishing CO. LTD, (2006).
- [2] Sendra, J. J. y Navarro, J. *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, (1997).
- [3] <http://www.juntadeandalucia.es/organismos/presidencia/areas/san-telmo/recuperacion/paginas/galeria-imagenes.html> (visitada 05/09/2014).
- [4] <http://www.iaph.es/web/canales/conservacion-y-restauracion/proyectos-destacados/san-telmo.html> (visitada 05/09/2014).
- [5] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: *Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos*. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010)."
- [6] Galindo, M., Zamarreño, T., Girón, S. *Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches*, J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1207-1218 (2009).
- [7] Alberdi, E., Galindo, M., León, A. L., Bueno, A. *El ambiente sonoro en la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla*, Tecniacustica 2014.
- [8] Vorländer, M. *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag; 2008.
- [9] Martellotta, F. *Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome*. J Acoust Soc Am 2009;126:1175-86.
- [10] Martellotta, F., Castiglione, M. L. *On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials*. Proceedings of the Forum Acusticum 2014.
- [11] Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC). *Ensayo interno*.