



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

ESTUDIO ACÚSTICO DE LA CATEDRAL DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

PACS: 43.55.Gx

Balestra, Francesca¹; Ciani Federica¹; Martellotta, Francesco¹; Nogueira López, Pedro Fernando²; Gómez Alfageme, Juan José³, Galindo del Pozo, Miguel⁴; Alvarez Morales, Lidia⁴; Alvarez, Angel⁴

¹Politécnico de Bari ;Via Orabona, 4 Bari; Italia;E-Mail: francesca_balestra@virgilio.it; f.ciani@studenti.poliba.it; francesco.martellotta@poliba.it

² Departamento de Física y Ciencias de la Tierra, Universidade da Coruña, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica; Rúa da Fraga, 27, 15008 A Coruña; España;Tel: 981167000;E-Mail: pedro.nogueira@udc.es

³ Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid; Nikola Tesla s/n 28031 Madrid;España;Tel:+34 913 367 775;Fax: + 34 91 331 9229;E-Mail: juanjose.gomez.alfageme@upm.es

⁴ Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, España, Tel: +34 954556612;E-Mail: mgalindo@us.es lidiaalvarezmorales@gmail.com arqangel@us.es

Palabras Clave: Modelo Acústico, Modelo Arquitectónico, Comportamiento Acústicos, Acústica de recintos, Acústica de templos

ABSTRACT

The purpose of this communication is the realization, for the first time, of an acoustic study of the Cathedral of Santiago de Compostela, realizing acoustic measurements in situ used for the validation of 3D acoustic models. The work has been developed thanks to the collaboration of research teams, the Polytechnic of Bari, the University of Seville and Polytechnic School of Madrid. A first set of acoustic measurements has been made using different methods. Then temporary parameters have been calculated from the measurements, with the aim of proposing any corrective actions.

RESUMEN

El objetivo de esta comunicación es la realización, por primera vez, de un estudio acústico de la Catedral de Santiago de Compostela, realizando mediciones acústicas in situ utilizadas para la validación de modelos acústicos 3D. El trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración de los equipos de investigación, Politécnico de Bari, la Universidad de Sevilla y la Escuela Politécnica de Madrid. Se ha realizado un primer conjunto de medidas acústicas utilizando diferentes métodos. Luego se han calculado los parámetros temporales a partir de las mediciones, con el objetivo de proponer acciones correctivas.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

INTRODUCCIÓN

La arquitectura en las iglesias cristianas, a lo largo de sus veinte siglos de historia, ha ido respondiendo a las necesidades y actividades que en ellas se desarrollaron, convirtiéndose en el resultado espacial de la manera de entender, el pueblo cristiano, la liturgia en cada momento histórico. [1]

Las primeras iglesias cristianas fueran concebidas como simples espacios de reunión, donde la liturgia se posicionaba como centro y razón de ser de la celebración. En los siglos siguientes, la arquitectura eclesial evolucionó según los distintos tipos arquitectónicos, llegando en un momento de la historia a perder prácticamente toda referencia con la liturgia primitiva. [2]

Siendo la lectura, la predicación y la escucha de la palabra de Dios la parte principal de la liturgia, las condiciones acústicas de las iglesias deberían haber sido consideradas para que el recinto cumpliera adecuadamente su función, pues la comprensión de la palabra y la inteligibilidad del discurso serían cruciales. Sin embargo, el problema acústico en las iglesias tuvo siempre un papel secundario frente a aspectos arquitectónicos, estéticos o formales. Introduciendo la música sacra en las celebraciones litúrgicas, la contradicción se duplica, pues palabra y música religiosa, requieren diferentes tiempos de reverberación. [3] Aunque el problema acústico en las iglesias fue considerado ligeramente, tras el Concilio de Trento (1545-1563), por la importancia que dio a la predicación, será a partir de la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II (1962-1965), [2] específicamente la constitución Sacrosanctum Concilium, que supuso un cambio en la sagrada liturgia cristiana. Se fomentó la participación plena y activa de los fieles, se estableció el carácter simbólico de las celebraciones y se subrayó la importancia de la palabra y la predicación del sacerdote, que, a partir de este momento, oficia mirando a los fieles y les habla en su lengua. En el estudio de la acústica de la iglesia, en los últimos 20 años se han habido numerosos estudios [4,5] que han llevado a una comprensión más profunda de las condiciones de la escucha en estos lugares, principalmente a partir de la detección experimental de los principales parámetros acústicos. El presente estudio es parte de esta investigación, que muestra los resultados preliminares de las mediciones acústicas realizadas en la catedral de Santiago de Compostela.

DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

La catedral de Santiago, empieza como un pequeño mausoleo romano del siglo I, en el que fueron enterrados los restos del apóstol Santiago (año 44 d.C.) en el año 813. Después del descubrimiento de las reliquias del apóstol, se ordenó una primera capilla de piedra y terracota. Siendo, demasiado pequeño para acomodar a los fieles, en 899 fue reemplazada por un templo destruido por el ataque de un líder musulmán y reconstruido en 1003, en un estilo prerománico, que la convertía en una grande catedral de peregrinación. La revolución estética final, llegó en 1860 con la fachada del Obradorio en estilo Barroco. Actualmente tiene un volumen de alrededor 50000 m³, una superficie en planta de 2511 m² y una capacidad de 620 personas sentadas.

Presenta principalmente materiales como el granito (suelo, paredes y coro), yeso (todo el templo) vidrio (ventanas), madera (bancos y confesionarios) típicamente caracterizados por los coeficientes de absorción, derivados de la literatura, que se muestran en la Tabla 1. Como se puede ver, los coeficientes son todos muy bajos, especialmente los que se refieren a las superficies más grandes, lo que sugiere que el tiempo de reverberación esperado será largo y depende fuertemente de la presencia de los fieles que, por el contrario, se caracterizan por una alta absorción de sonido.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

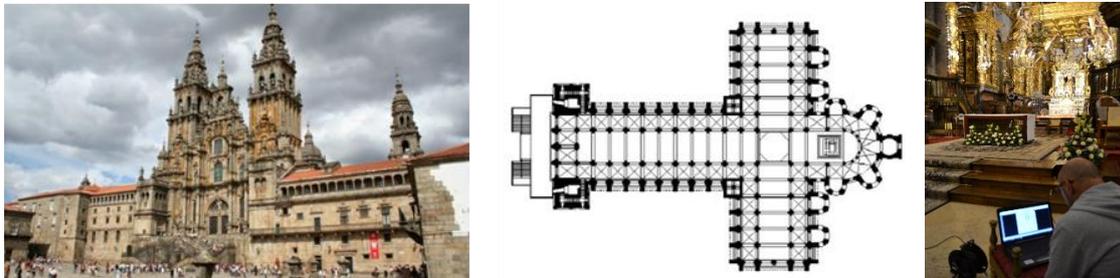


Figura 1. Fachada del Obradorio, planta de la Catedral de Santiago [6] y interior de la medición

Tabla 1. Coeficientes de absorción por bandas de octavas, de los principales materiales [7]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Yeso	0.05	0.05	0.05	0.09	0.07	0.07
Granito	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Confesionarios	0.27	0.25	0.10	0.06	0.06	0.06
Bancos	0.10	0.15	0.18	0.20	0.20	0.20
Vidrio	0.25	0.15	0.05	0.04	0.03	0.03

Este aspecto es particularmente relevante ya que las medidas propuestas a continuación se refieren a la iglesia vacía, mientras que se esperan diferencias significativas en presencia de los fieles, para tener en cuenta tanto los cálculos simplificados basados en la fórmula de Sabine como los más sofisticados herramientas de pronóstico basadas en acústica geométrica.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Los tres grupos de investigación han seguido una metodología desarrollada en los siguientes puntos:

- Toma de datos generales y levantamiento planimétrico.
- Realización de mediciones acústicas in situ, procesado y valoración acústica de las mismas. Específicamente, decidir el puesto para colocar las fuentes (3) y los receptores (25) a lo largo de la nave principal y del transepto en planta y luego en la Catedral.
- Procesamiento del modelo 3D simplificado a través del programa CATTAcoustic para comprender el efecto de la presencia de los fieles.
- Posibles propuestas de rehabilitación acústica a partir de la valoración realizada tras las mediciones acústicas in situ.

Las mediciones se realizaron durante la noche, con el fin de minimizar el ruido de fondo, y los requisitos de ISO 3382-1 [8], así como de acuerdo con las prescripciones específicas establecidas para las iglesias, se llevaron a cabo [9]. Con referencia a la disposición de fuentes y receptores, la catedral de Santiago se aleja de la configuración típica de las iglesias españolas [9], por lo que se han elegido las siguientes posiciones: Altar mayor (S1), púlpito (S2) y altar moderno (S3). En el púlpito, la fuente debe colocarse lo más cerca posible de la balaustrada para simular la posición natural del orador. Sobre los receptores, la catedral de Santiago, con planta de cruz latina, es casi perfectamente simétrica, según el eje longitudinal y transversal. Esto

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

permitió que las mediciones se hicieran solo en la mitad de la iglesia, colocando solo 3 receptores de control en la otra mitad. Estos datos se procesan para extrapolar los parámetros acústicos, temporales y energéticos, a los que se pueden aplicar mejoras. La disposición de los puntos de emisión y recepción se muestra en la Figura 2. Todas las fuentes se colocaron a una altura de 1.70 del suelo, mientras que los receptores estaban a 1.20 m del suelo.

El proceso de adquisición de respuestas de impulso, a partir del cual se determinaron todos los parámetros acústicos (de acuerdo con ISO 3382-1 [8], fue realizado por los equipos de los diversos laboratorios de investigación, cada uno con su propia instrumentación, con el fin de garantizar una cobertura completa de toda la iglesia y garantizar la detección de todos los parámetros acústicos monoaurales y binaurales. En particular, como fuentes de sonido se han utilizado dodecaedros AVM DO-12 con amplificador B&K 2734, una fuente B&K 4296, y una fuente autoconstruida. Las grabaciones se hicieron utilizando diferentes tipos de micrófonos, en particular: micrófono B-format Soundfield ST350, un micrófono Audio-Technica AT4050 / CM5 en sus configuraciones omnidireccionales y en forma de ocho, una cabeza binaural Head III (Head Acoustics) conectada a un acondicionador de señal B&K-2829, dos micrófonos AKG (omnidireccionales y en forma de ocho).

La complejidad volumétrica y el diseño del plan de muchas iglesias hacen que la elección de las ubicaciones de los receptores sea aún más difícil (y subjetiva) que la elección de las ubicaciones de las fuentes. Generalmente la elección final es el resultado de un compromiso entre dos necesidades opuestas. Por un lado, la necesidad de tener una imagen precisa de la variación de los parámetros acústicos dentro de la iglesia, lo que lleva a maximizar el número de posiciones de fuente y receptor (Fig. 2). [9-10]

La metodología utilizada por los tres grupos de investigación ha sido desarrollada con el objetivo de ser la más optimal para que los datos se podrían compartir entre todos.

Las respuestas de impulso (RI) se registraron excitando el gabinete con señales barridas por el seno, en las que la frecuencia de exploración aumenta exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencia, el nivel y la duración de la señal de excitación se ajustaron para que el rango de frecuencia cubriera las bandas de octava de 63 a 16000 Hz, y la relación de impulso a ruido (INR) sería de al menos 45 dB en cada octava banda para garantizar la precisión de ciertos parámetros, como T30.

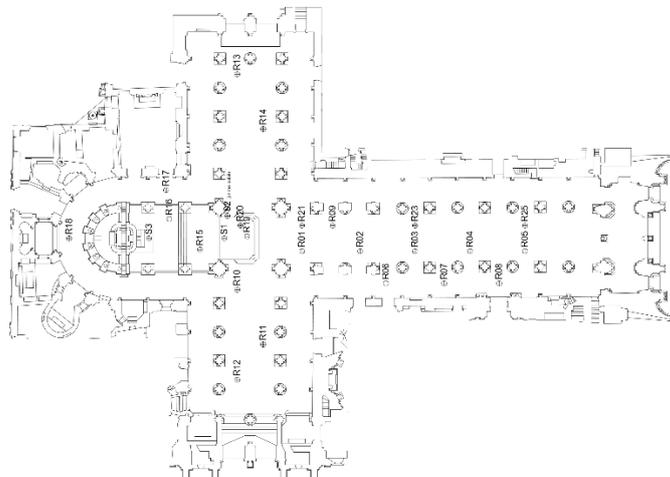


Figura 2. Planta con la colocación de Fuentes (S) y receptores (R)



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

A partir de las respuestas de impulso adquiridas (monoaural, figura 8, binaural y B-format), se calcularon los siguientes parámetros acústicos, calculados según ISO 3382-1 [8], utilizando el software Aurora para Audacity [11]: T30, T20, EDT, Ts, C80, C50, JLF, IACC.

RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSION

Las mediciones fueron precedidas por una planificación según la cual a cada equipo se le asignó un área de medición diferente dentro de la catedral. Al hacerlo, al final de las operaciones compartirían las mediciones individuales para lograr un mapeo único y más rápido de la catedral. Sin embargo, al realizar el trabajo, fue necesario repetir las medidas de algunos puntos para poder compararlos. Es posible ver esta comparación de los gráficos colocados.

La Figura 3 muestra la tendencia de los parámetros acústicos, espacialmente promediados, de acuerdo con la frecuencia y las posiciones de la fuente. Las Figuras 3a y 3b muestran que para el T30 y el T20 no aparecen diferencias particulares dependiendo de la posición de la fuente, como era lógico esperar. Para EDT (Fig. 3c), aparecen diferencias significativas entre la posición 2 (púlpito) y las otras, razonablemente debido a una menor contribución de las reflexiones iniciales, particularmente evidente en las frecuencias más bajas. La misma tendencia aparece, con diferencias menos evidentes, también en los otros parámetros de energía (Fig. 3d-f). Sin embargo, para comprender mejor las diferencias observadas, es necesario representar la tendencia de los parámetros según la combinación fuente-receptor.

La Figura 4a muestra la tendencia del T30 según la posición de cada receptor. Para los 3 equipos, es posible observar cómo los resultados considerados en las frecuencias medias (500 Hz y 1000 Hz) son casi idénticos y tienen un valor medio de 4 s.

De forma similar, en la Figura 4b, en la que se muestra la tendencia del T20, se observa que los resultados son superponibles y comparables con el T30.

La figura 4c muestra la tendencia de EDT según las combinaciones fuente-receptor. Este parámetro muestra una variación más marcada según la posición, asumiendo valores más bajos cerca de las fuentes, mientras que el aumento de la distancia se observa un aumento. Esta tendencia es típica y es la consecuencia de la reducción de las primeras reflexiones cuando la distancia es mayor. Por otro lado, para los receptores ubicados dentro del presbiterio se observa una reducción considerable del parámetro (con valores entre 1 y 2 s), compatible con el hecho de que esta parte de la iglesia está sustancialmente aislada del resto y ricamente decorada. En este caso, será necesaria una investigación más detallada para investigar la presencia de pendientes dobles en la curva de disminución de sonido.

El análisis del rendimiento de los parámetros de energía (Ts, C50 y C80), como se muestra en las Figuras 4d-f, muestra un comportamiento comparable al de EDT, con valores de claridad muy altos dentro del presbiterio (todos positivos, con picos de hasta 10 dB para C50 y C80), para indicar una alta inteligibilidad de los mensajes de sonido, mientras que a mayores distancias, a lo largo del pasillo principal, se observan valores negativos de casi -10 dB para C80 y -15 dB para C50.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

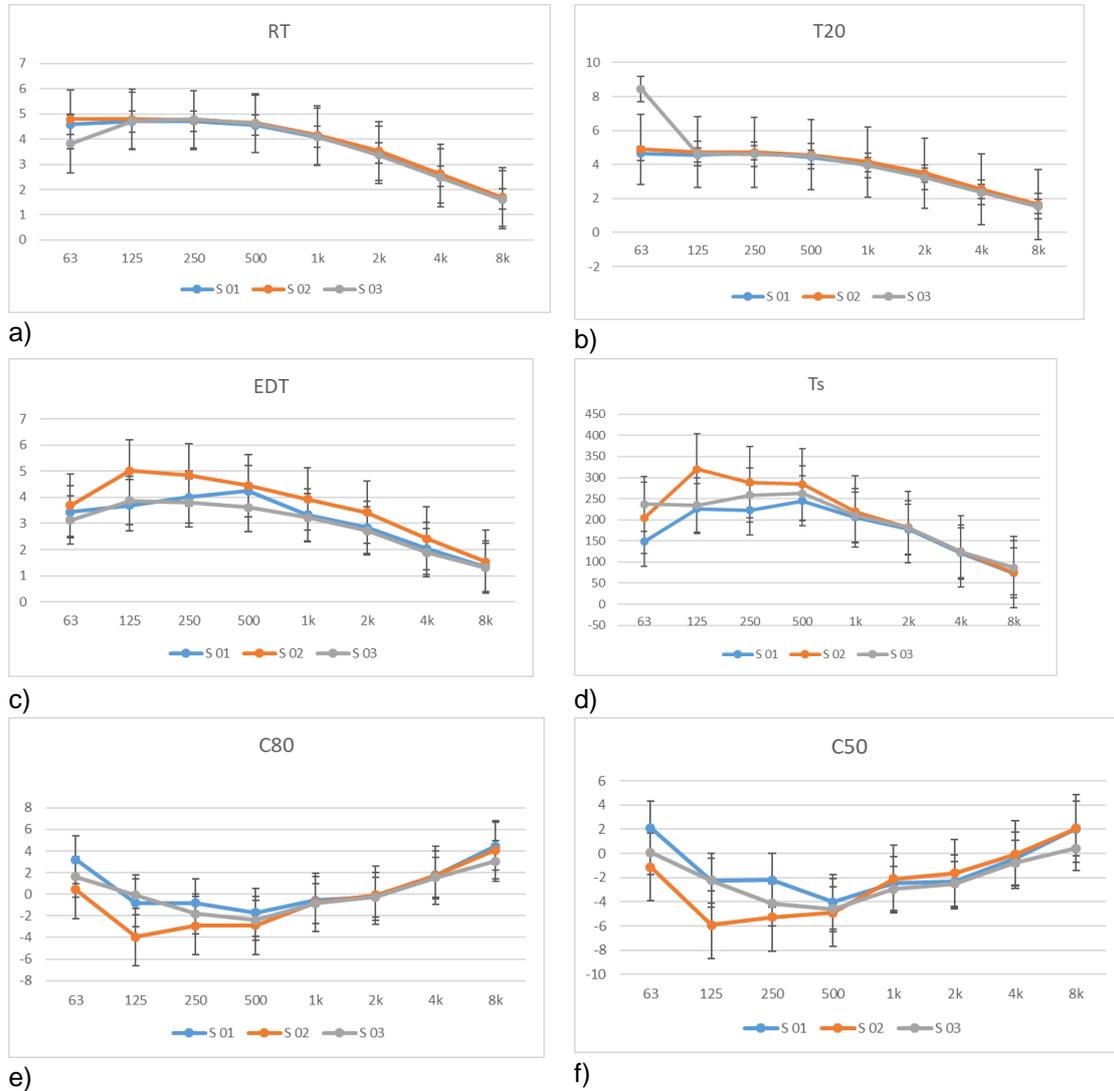


Figura 3. Valores promedio de los parámetros acústicos según la frecuencia y la posición de la fuente: a) T30, b) T20, c) EDT, d) Ts, e) C80, f) C50. Las barras de error representan la desviación estándar.

Finalmente, un aspecto interesante para examinar es la variación del tiempo de reverberación debido a la ocupación. Esperando completar la elaboración del modelo acústico, se utilizó la fórmula Sabine, considerando el volumen real de la iglesia. Teniendo en cuenta solo el número de asientos, teniendo en cuenta la absorción acústica per cápita típica [12], se ha calculado un tiempo de reverberación en las frecuencias medias de 3,2 s. Será necesario un análisis más a fondo utilizando el modelo acústico geométrico para confirmar estos datos y verificar el nivel de inteligibilidad del habla en condiciones de pleno empleo.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

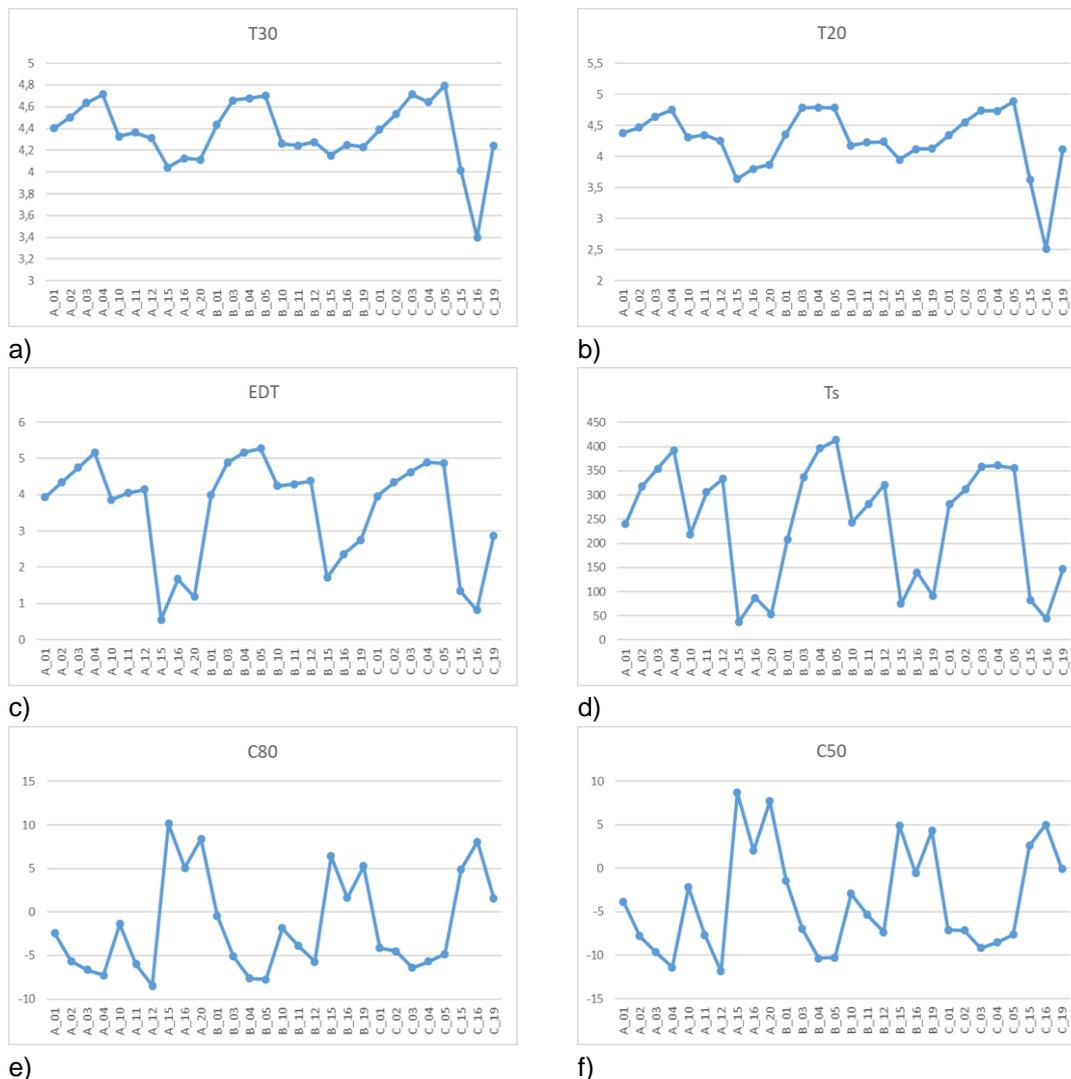


Figura 4. Gráfico de los parámetros acústicos en las frecuencias medias (500 Hz-1 kHz) según la combinación fuente-receptor: a) T30, b) T20, c) EDT, d) Ts, e) C80, f) C50.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta los resultados preliminares de las primeras mediciones acústicas realizadas en la Catedral de Santiago di Campostela. Las mediciones mostraron un tiempo de reverberación de iglesia vacío de 4.3 s en frecuencias medias, mientras que dentro del área presbiterial las condiciones acústicas son muy diferentes con un EDT mucho más bajo entre 1 y 2 s y valores de claridad altos. En presencia de la ocupación por parte de los fieles, el tiempo de reverberación debe descender a 3.2 s (suponiendo la presencia de fieles sentados solo en áreas donde hay bancos, de hecho descuidando a una gran parte de las personas que habitualmente ocupan los pasillos) lateral, lo que de hecho sobreestima el T30 realmente alcanzable). Se están realizando otros estudios, incluida la creación de un modelo acústico virtual con el que se estudiarán en detalle los efectos del empleo y los posibles tratamientos correctivos.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Catedral Santiago por brindarnos el acceso para el estudio acústico y archivístico de este magnífico lugar.

A Jose Carlos Alonso Seoane, párroco de la Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (A Coruña) para ser la llave de todo.

REFERENCIAS

- [1] Suarez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the domus ecclesiae to the basilica. Acta Acustica united with Acustica, 99(2), 292-301, (2013).
- [2] Bueno López, A.M. El sonido en la arquitectura religiosa de M.Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica. Tesis doctoral, Sevilla (2013)
- [3] Navarro, J. Y Sendra, J.J. La iglesia como lugar de la música. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds). Madrid (1996)
- [4] Cirillo E, Martellotta F, Worship, acoustics, and architecture, Multi-science publishing, Brentwood, (2006).
- [5] Girón S., Álvarez-Morales L., Zamarreño T. Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research, J. Sound Vib. 411, 378-408 (2017).
- [6] Fundación Catedral Santiago
- [7] Meyer J., Kirchenakustik, Verlag Erwin Bochinsky, (2003)
- [8] ISO 3382-1:2009. Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2009).
- [9] Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P. Guidelines for acoustical measurements in churches. Appl. Acoust. 70, 378-388, (2009).
- [10] 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. Build. Environ. 72, 102–115, (2014).
- [11] Campanini S., Farina A., A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module, Linux Audio Conference, Parma, April 16-18 (2009).
- [12] Martellotta F., D'Alba M., Della Crociata S., Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences, Appl. Acoust. 72 341–349 (2011).