

MODELING THE ACOUSTICS OF SANTIAGO DE COMPOSTELA CATHEDRAL (2018-2020)

Gomez Alfageme. J.J.¹, Balestra F.¹, Parra Alonso F.¹, Blanco Martin E.¹, Nogueira López P.²

¹ETSIST - GAMMA - UPM

juanjose.gomez.alfageme@upm.es; f.balestra@alumnos.upm.es; lf.parra@alumnos.upm.es; elena.blanco@upm.es

²EUAT - UDC

p.nogueira@udc.es

Resumen

En 2018 comenzó el contacto de nuestro grupo de investigación con la Catedral de Santiago de Compostela. Desde ese momento se han realizado con campañas de medidas para la determinación de la acústica de la Catedral. Durante la realización de estas campañas, la Catedral se encontraba en proceso de rehabilitación y las condiciones acústicas fueron completamente distintas.

El objetivo de la presente comunicación pretende reflejar la acústica de la Catedral en esos dos procesos de rehabilitación mediante la determinación de diferentes parámetros acústicos obtenidos a partir de mediciones realizadas in situ de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 3382 Parte 1.

El siguiente objetivo del proyecto es el diseño de modelos geométricos de la catedral de manera que permitan simular el comportamiento acústico de la Catedral en esas dos situaciones. Se partió del diseño de modelos arquitectónicos a partir de planos proporcionados por la Fundación Cas da Fábrica. Posteriormente, se simplificaron estos modelos hasta obtener modelos geométricos a los que se incluyeron los materiales acústicos.

El siguiente paso es la validación de los modelos geométricos a partir de las medidas obtenidas in situ. Se realizan validaciones de los diseños empleando tanto la teoría estadística como la teoría geométrica.

Palabras clave: modelado acústico, validación, parámetros acústicos.

Abstract

The contact of our research group with the Cathedral of Santiago de Compostela starts in 2018. Since that time, two campaigns of measures for the determination of the Cathedral's acoustics, have been carried out. At this moment, the Cathedral was in the process of reforms, so in the two cases have been obtained very different acoustical conditions.

First purpose of this communication is to reflect the acoustics of the Cathedral in these two rehabilitation processes by determining different acoustics parameters obtained from measurements realized "in situ" according to the Standard UNE-EN ISO 3382 Part 1.

The following objective of this study is to create virtual models of the Cathedral so as to simulate the acoustic behavior of the Cathedral in each of the two contexts. This all started with the creation of 3D architectural models based on plans provided by the Casa da Fábrica Foundation. Subsequently, these models were simplified to obtain geometric models to which acoustic materials were included.

The next step is to validate the geometric models from measurements obtained "in situ". Validated models are performed using both statistical and geometric theories.

Keywords: acoustic modeling, validation, acoutic parameters.

PACS n°. 43.55.Gx, 43.55.Ka

1 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]

Sin embargo, el problema acústico en las iglesias tuvo siempre un papel secundario frente a aspectos arquitectónicos, estéticos o formales y solo en los últimos 20 años esta aparente despreocupación, ha cambiado, apreciándose un notable interés por parte de la comunidad científica y un progreso destacable en la consideración del problema acústico en los recintos culturales de muchas confesiones religiosas, principalmente a partir de la detección experimental de los principales parámetros acústicos. El presente estudio es parte de esta investigación.

La Catedral de Santiago de Compostela, en el contexto de las catedrales españolas, representa una excepción significativa. De hecho, su disposición interior es sensiblemente diferente de la mayoría de Catedrales españolas, donde el coro típicamente rompe la nave principal creando muchos subespacios. Aquí la planta sigue la forma de cruz latina que permite a los peregrinos mirar el altar desde casi todas partes, según una distribución interior más similar a las típicas catedrales italianas y a otras iglesias de peregrinación en Francia.[2]

En 2018 comenzó el contacto del grupo de investigación GAMMA (UPM-UDC) con la Catedral de Santiago de Compostela. Desde ese momento se han realizado dos campañas de medidas para la determinación de la acústica de la Catedral. Este trabajo recoge algunas de las medidas que se llevaron a cabo en los meses de mayo y noviembre 2018.

En primer lugar es necesario explicar las condiciones en las que se realizaron las medidas, ya que la Catedral se encontraba en un proceso de reformas que afectaba a varias áreas, y llevó a enfrentarse con condiciones acústicas completamente distintas. En mayo de 2018, se estaba restaurando la zona superior del altar mayor y la cúpula, a la vez que se llevaba a cabo la etapa final de la restauración de la pintura del grupo escultórico del Pórtico de la Gloria. Mientras las dos primeras áreas se cubrieron con andamios y telas protectoras, en el segundo caso, hubo una separación física de la última zona de arcos de la nave por una mampara de vinilo, que cerraba prácticamente la parte final de la Catedral (incluido el Pórtico) y podía suponer una reducción del volumen total de la misma. En noviembre 2018, las reformas en la zona central de la catedral ya se habían terminado, y la mampara de vinilio se había substituido por un sutil andamio que limitaba el acceso al Portico.

Los trabajos de rehabilitación seguían en áreas distintas de la Catedral, pero la diferente configuración y disposición de los andamios nos llevó a enfrentarnos a características acústicas y geométricas totalmente diferentes.

2 Descripción del edificio

La Catedral de Santiago de Compostela, empieza como un pequeño mausoleo romano del siglo I, en el que fueron enterrados los restos del apóstol Santiago el Mayor (fallecido en el 44 d.C.) en el año 813. Su descubrimiento, hacia el año 820-830, dio lugar, con Jerusalén y Roma, a unos de los tres grandes centros de peregrinación de la historia Cristiana.

La primera capilla de piedra y terracotta, demasiado pequeña para acomodar a los fieles, fue reemplazada, en el año 899, por un templo, luego destruido en una incursión musulmana dirigida por Almanzor y posteriormente reconstruido en 1003, en un estilo prerománico.

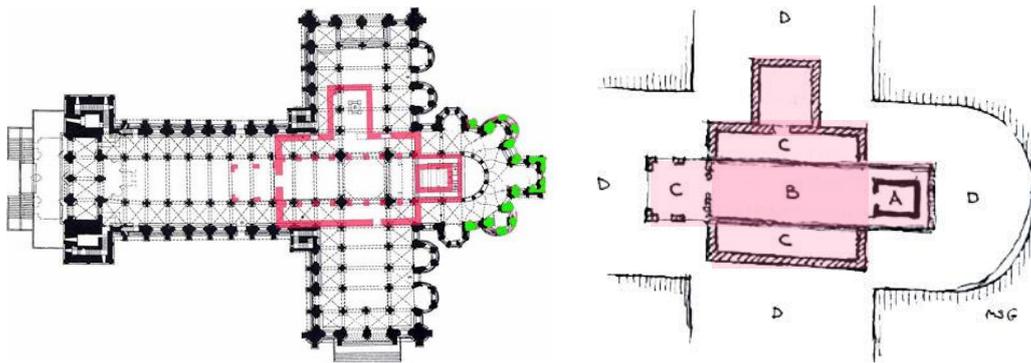


Figura 1 –Plano de la Basílica original (en rojo) sobre el de la actual Catedral [3]

Figura 2 – A-Mausoleo romano B-Iglesia de Alfonso II C-Iglesia de Alfonso III D-Crucero de la Catedral [4]

Según fuentes oficiales, la construcción de la Gran Catedral de Santiago de Compostela se inició hacia el año 1075 durante el reinado de Alfonso VI, patrocinada por el obispo Diego Peláez y dirigida por el maestro Bernardo el Viejo y el maestro Esteban. A partir del año 1100 y a lo largo del siglo XII, bajo el mandato del arzobispo Gelmírez, continuó la obra el maestro Bernardo el Joven (maestro de Platerías). Se puede decir que la mayor parte de la Catedral fue terminada en 1122. En 1168 el maestro Mateo completó la catedral, incluyendo la fachada oeste, el Pórtico de la Gloria, la cripta bajo la fachada oeste y la construcción del coro en la nave principal, por lo que en 1211 se celebró la consagración de la Basílica con la presencia del rey Alfonso IX.[5]

La revolución estética final, llegó en 1860 con la realización de la fachada del Obradorio en estilo Barroco.



Figura 3 – Evolución de la construcción de la catedral románica durante los siglos XIII y XIV

A nivel de arquitectura interior, podemos destacar que la Catedral tiene forma de cruz latina basilical, con tres naves y un amplio transepto a su vez dividido en tres naves con cuatro capillas y una girola de gran tamaño con cinco capillas. El elemento más original de esta zona de la Basílica, y que se extiende por todo el Transepto, es la existencia de un triforio o segundo piso, que recorre las naves laterales de la Basílica, continuando por el transepto y la girola, hasta atravesar la catedral. Todas estas capillas, junto con el triforio, garantizaban una amplia gama de espacios y posibilitaban la celebración del culto simultáneo.

Actualmente las dimensiones de la Catedral son 100 metros de longitud de la basílica, 70 metros de longitud del crucero, 8,3 metros de ancho en la nave y transepto, 4,3 metros de ancho en las naves

laterals (central y transepto), 22 metros de alto en la nave central y transepto y 32 metros de altura en la cúpula del crucero. Tiene un volumen de alrededor 50000 m³, una superficie en planta de 2511 m² y una capacidad de 620 personas sentadas.

A nivel constructivo presenta principalmente materiales como el granito (suelo, paredes y triforio), yeso (en las bóvedas de todo el templo), vidrio (ventanas), madera, escayola y metal en los diferentes altares y madera y metal en los dos órganos.

Tabla 1 – Coeficientes de absorción por bandas de octavas, de los principales materiales

	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
Madera	0.27	0.25	0.10	0.06	0.06	0.06
Alfombras	0.03	0.05	0.09	0.23	0.38	0.54
Vidrio	0.25	0.15	0.05	0.04	0.03	0.03

3 Metodología de investigación

Tanto en mayo como en noviembre, las medidas fueron realizadas durante la noche, para minimizar el ruido de fondo, y optimizar el tiempo. Pero, mientras en el primer caso, la administración de la Catedral de Santiago nos permitió el acceso a la catedral desde las 21:00 del 21 de mayo a las 07:00 del 22 de mayo, en noviembre nos dieron la posibilidad de acceder a la Catedral desde el día 19 hasta el 22, con el mismo horario anterior.

De acuerdo con las prescripciones específicas establecidas en la norma ISO 3382-1[5] para las Iglesias, las mediciones se llevaron a cabo cronológicamente en el siguiente orden:

- Toma de datos generales y levantamiento planimétrico.
- Colocación de fuentes y receptores a lo largo de la nave principal y del transepto
- Realización de mediciones acústicas in situ, procesado y valoración acústica de las mismas.

3.1 Posiciones de Fuentes

La catedral de Santiago se aleja de la configuración típica de las iglesias españolas, por lo que, se decidió ubicar las fuentes sonoras en las siguientes posiciones: (S1) Altar mayor, púlpito (S2) y altar moderno (S3) (tanto en mayo como en noviembre); en noviembre se añadió una posición mas (S4) situada en la zona bajo la cúpula del crucero. Mientras en las dos primeras posiciones, las fuentes de sonido se colocan justo en el eje de simetría, en el púlpito, la fuente se coloca lo más cerca posible de la balaustrada para simular la posición natural del sacerdote; la fuente S4 se colocó también en el eje longitudinal de la catedral. En todos los casos se utiliza una fuente de tipo dodecaédrica (omnidireccional).

3.2 Posiciones de Micrófonos

Una regla general que se debe seguir es que los receptores se ubiquen preferentemente en el área de escucha principal (MLA), aunque para las iglesias dicha área se define mucho menos que en los espacios de interpretación. De hecho, en muchas iglesias (especialmente las muy grandes) el área ocupada por bancos o asientos puede variar en función del período del año con el área más grande observada durante los días Santos principales. Además, también se debe considerar que las personas

de pie no son inusuales en las iglesias. En consecuencia, para el propósito de las mediciones acústicas, el MLA debe definirse como la combinación del área más grande cubierta por bancos y el área que es más probable que sea ocupada por permanecer de pie.

3.3 Configuración Fuente-Micrófonos

En mayo se decidió utilizar 3 posiciones de fuentes, mientras que en noviembre 4, colocadas a 1,7 m de altura del suelo. Teniendo la catedral una planta de cruz latina, casi perfectamente simétrica, según el eje longitudinal y transversal, se decidió medir solo en la mitad de la iglesia (se ubicaron también micrófonos de control en posiciones simétricas con respect del eje longitudinal, para algunos micrófonos). En mayo se colocaron 23 receptores a un altura de 1,20 m del suelo (12 en la nave principal, 5 en el crucero, 4 en la zona del altar-coro y 2 en el deambulatorio) y solo 3 receptores de control en la otra mitad. De las 23 posiciones, solo se registraron datos de 18 de ellas debido a problemas de tiempo. En noviembre se colocaron 23 receptores a un altura de 1,20 m del suelo, así como 5 receptores de control en la otra mitad. Todas las posiciones se registraron correctamente.

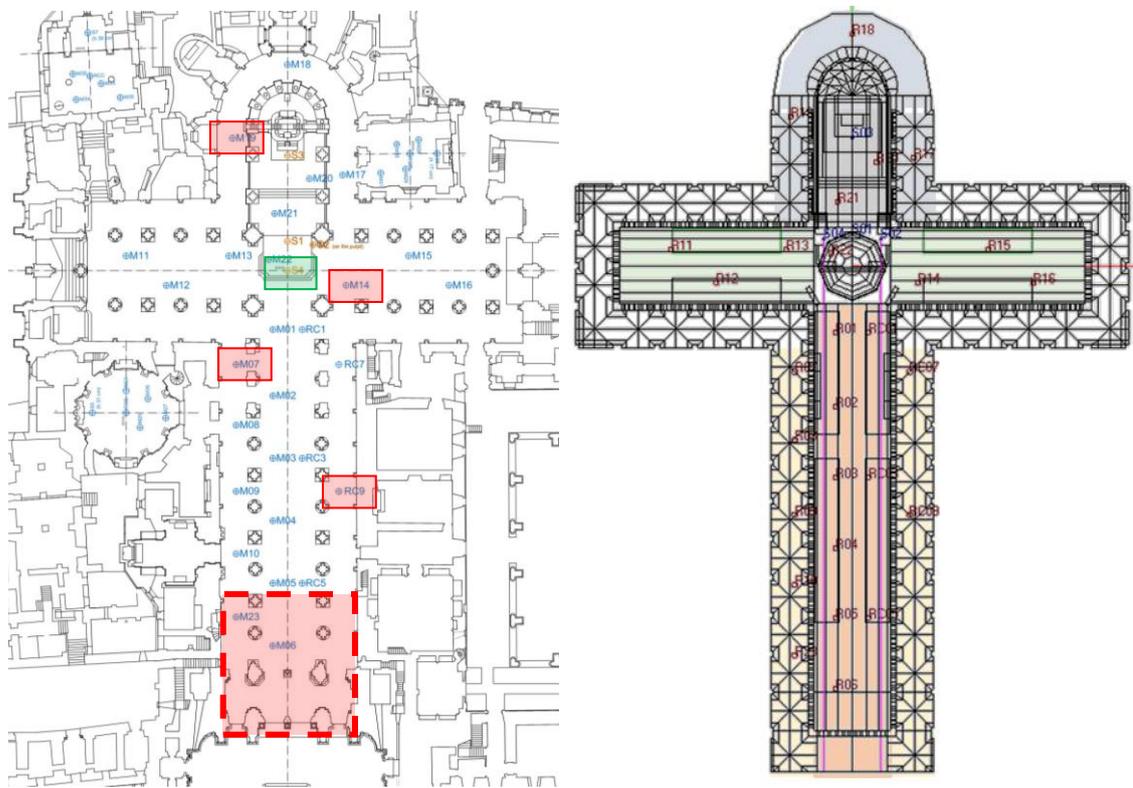


Figura 4 – colocación de Fuentes (S) y receptores (R) en Mayo (Azúl) y en Noviembre (Rojo)

Figura 5 – Zonas Catedral: Nave Central (Naranja)-Naves Laterales (Amarillo)-Transepto (Verde)-Altar (Gris)-Girola (Azúl)

Se utilizaron dos fuentes sonoras omnidireccionales dodecaédricas DO-AV 12, un amplificador de potencia CROWN 2500, un micrófono omni-direccional AKG C-92, un micrófono bidireccional, AKG C-91 (ambos montados sobre un soporte doble), un Simulador de cabeza y torso B&K 4128 conectada a un acondicionador de señal B&K 2829, un sistema de adquisición B&K 3676, una tarjeta de sonido MOTU UltraLite- mk4 y DIRAC v6.0 como sistema de adquisición. También se utilizó un sonómetro B&K 2260 para mediciones de ruido ambiental y una estación meteorológica para la determinación de los valores ambientales (temperatura, presión y humedad relativa).

Los parámetros acústicos se obtuvieron a partir de la respuesta al impulso, medida para cada combinación fuente-receptor. La codificación utilizada fue p. Ej. S01R01 (Source 01-Receptor 01). Como señal de excitación se empleó un barrido exponencial de tonos puros de 20 Hz a 20 kHz con una duración de 21,3s.[7] La amplificación de la tarjeta de sonido y del amplificador de potencia se ha mantenido constante durante todo el proceso de medición, comprobando previamente que la relación señal-ruido no produciese saturación en ninguna combinación fuente-receptor.

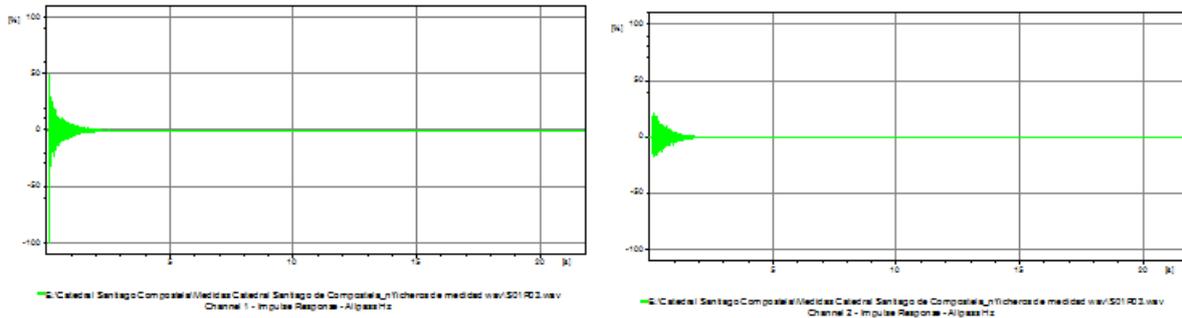


Figura 6 – Respuesta al impulso de ambos micrófonos

Al procesar los datos, se encontró que existían diferencias significativas entre las posiciones ocupadas por los receptores en la Catedral y se decidió realizar un estudio para separar áreas de la Iglesia según el uso litúrgico de las mismas. Fué así que se dividió la Catedral en 4 zonas: nave principal (R01, R02, R03, R04, R05, R21, R23, R25 en mayo, y M01, M02, M03, M04, M05, M06, RC1, RC3, RC5 en noviembre); transepto (R10, R11, R12, R13, R14 en mayo, y M11, M12, M13, M14, M15, M16 en noviembre); altar-coro (R19, R20, R15, R16 en Mayo, y M20, M21, M22 en noviembre); girola (R17, R18 en mayo, y M17, M18, M19 en noviembre); en noviembre se añadieron también las naves laterales (M07, M08, M09, M23, RC7, RC9). Para cada una de las áreas anteriores, se ha realizado un estudio por separado de todas las fuentes y todos los receptores.

En ambas campañas de medida, se calcularon, en bandas de 1/1 octava y 1/3 de octava, los resultados de tres parámetros temporales (EDT, T20, T30), cuatro parámetros de energía (D50, C50, C80, Ts), un parámetro espacial (LF) y dos parámetros de inteligibilidad (AICons, STI).

A continuación se muestra la comparación entre algunos de los resultados obtenidos en mayo y noviembre.

El objetivo de este trabajo es enfocar la atención sobre los cambios acústicos que se han manifestados en algunas áreas de la Catedral al quitar los andamios y, por lo tanto, al modificar el volume interior, absorción y difusión del recinto. Para facilitar la comparación, a la izquierda se muestran los resultados de mayo y a la derecha los de noviembre.



Figura 7 – EDT (a) Nave Central; EDT (b) Altar

Confrontando los valores de EDT se puede observar que tanto en la nave principal como en la zona del altar se manifiestan unas variaciones en bajas y medias frecuencias debidas a la “presencia/ausencia” de andamios y telas protectoras que afecta la percepción de la reverberación temprana. Además, se puede observar como en la zona del altar, hay una disminución general de los valores debida a la especial configuración de la misma, con un baldaquino de menor altura que el resto de la Iglesia y la presencia de ventanas que la rodean hasta separarla totalmente del deambulatorio, así como a la presencia de los andamios de la rehabilitación de esa zona.

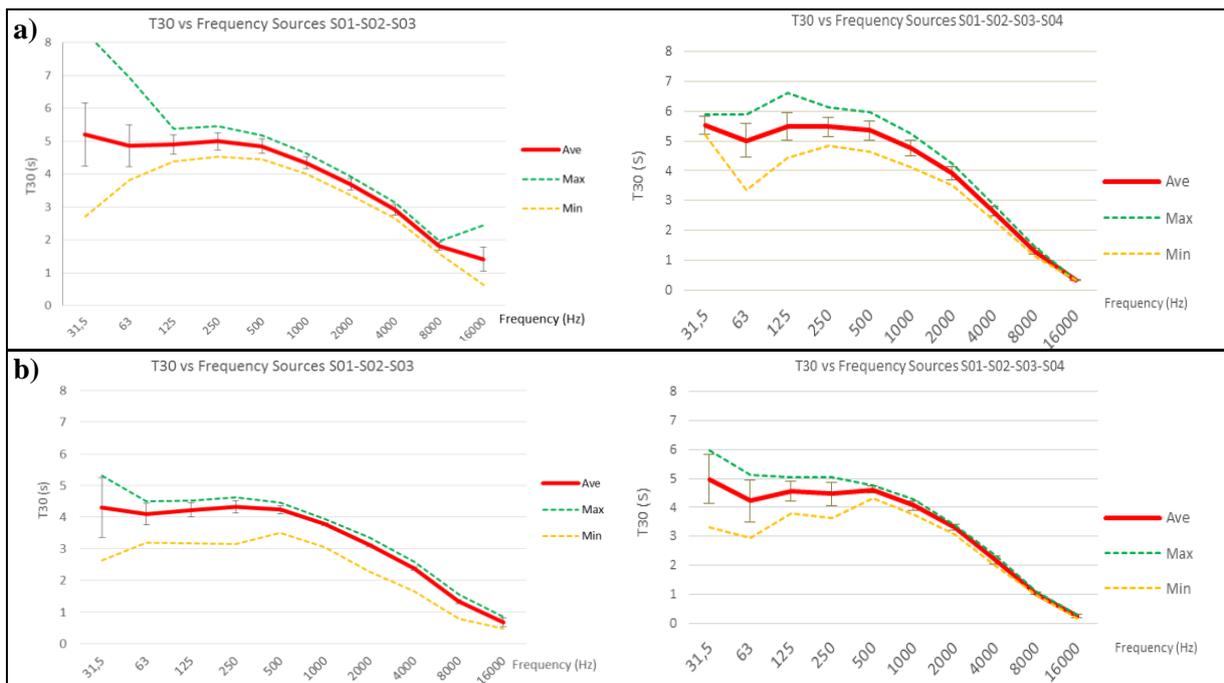


Figura 8– T30 (a) Nave Central; (b) Altar

Las variaciones del T30 no resultan tan marcadas en las áreas de Nave Central y Altar para ser una estimación de la reverberación en un período de tiempo ligeramente más extenso que EDT.



Figura 9 – (a) D50 Altar; (b) C80 Altar; (c) Ts Altar

En cuanto a los parámetros energéticos de tiempo central T_s y Claridad C80, se aprecian muy buenos valores en la zona de altar, en particular en el caso de T_s que se presenta muy bajo. Esto será determinante en la percepción de una mayor cantidad de campo directo que ayudará a la inteligibilidad de la palabra en esta área frente a las demás. En el caso del parámetro de definición D50 se observa una diferencia acusada entre los resultados obtenidos en mayo y los de noviembre sobre todo en las medias frecuencias, donde los valores muy bajos se deben a un exceso de reverberación



Figura 10 – LF Nave Central (a); LF Altar (b)

La fracción de energía lateral LF, es relativamente alta en todas las áreas, menos en la Nave Central por su longitud y las pocas reflexiones que se producen entre las arcadas y los pasillos. En la zona del Altar los valores obtenidos en Noviembre parecen normalizarse y acercarse más a los de la Nave Central, aunque siguen siendo bastante altos, debido a la multitud de reflexiones producidas entre el baldaquino y las ventanas laterales.

Tabla 2 – Valores promedio de todas las combinaciones Fuente-Micrófono mayo (a)

a	EDT _{mid} (s)	T20 _{mid} (s)	T30 _{mid} (s)	D50 _{mid} (-)	C50 _{mid} (dB)	C80 _{mid} (dB)	Ts _{mid} (ms)	LF _{mid} (-)
Oct Band	500-1k	500-1k	500-1k	500-2k	500-2k	500-2k	500-1k	500-2k
JND	5%	5%	5%	0.05	1 dB	1 dB	20 ms	0.05
Mean	3.84	4.48	4.358	0.29	-5.32	-2.86	266	0.44
Std	1.27	0.43	0.31	0.24	6.07	5.16	113	0.23
Std≡N JND	6.7	2	1.5	4.8	7	6	5.5	4.5

Tabla 3 – Valores promedio de todas las combinaciones Fuente-Micrófono noviembre (b)

b	EDT _{mid} (s)	T20 _{mid} (s)	T30 _{mid} (s)	D50 _{mid} (-)	C50 _{mid} (dB)	C80 _{mid} (dB)	Ts _{mid} (ms)	LF _{mid} (-)
Oct Band	500-1k	500-1k	500-1k	500-2k	500-2k	500-2k	500-1k	500-2k
JND	5%	5%	5%	0.05	1 dB	1 dB	20 ms	0.05
Mean	4.65	4.77	4.80	0.58	-8.13	-5.53	343.44	0.53
Std	0.30	0.39	0.40	0.12	1.49	1.33	41.35	0.018
Std≡N JND	1.3	1.7	1.7	2.4	2	2	2.1	1

En las tablas anteriores se ha imytemtado expresar la desviación estándar de los difeentes parámetros en JND equivalents, con el fin de tener una idea de la dispersión de los datos medidos a la hora de hacer la posterior validación de los modelos geométricos. Comparando los resultados se observa como los altos valores de la desviación estándar y de los JND equivalentes de algunos parámetros bajan en noviembre, presentando un comportamiento mucho más homogéneo. Se puede observar que la desviación estándar de casi todos los parámetros está comprendida entre 1 y 2 JND equivalents.

Solamente presenta una desviación mayor, el parámetro T_s , aunque tratándose de una iglesia de estas dimensiones sería más adecuado considerar que el JND para este parámetro estuviese cercano a los 30-40 ms, con lo que se obtendría un JND equivalente entre 1 y 2 [8].

3.4 Modelo Geométrico

A partir de las primeras mediciones in situ (mayo 2018), los valores de los diferentes parámetros acústicos, han permitido iniciar el primer estudio acústico de la Catedral de Santiago de Compostela ya que hasta ese momento se habían realizado trabajos con modelos simulados, pero sin calibrarlos a partir de medidas reales [9]. Desde ese momento, nuestro grupo de investigación, empezó a desarrollar un modelo geométrico de la Catedral, de manera que se pudiera simular su comportamiento acústico. El modelo desarrollado debería permitir la simulación de la Catedral adaptado a las diferentes situaciones de rehabilitación en las que se realizaron las medidas. Actualmente se continúa trabajando en la validación acústica de la Catedral con herramientas informáticas que permiten simular de la forma más realista la acústica del lugar. En la Figura 11 se muestra el Modelo 3D de la Catedral, con las mamparas de vinilio (en rojo) que tapaban el Portico de la Gloria y los andamios y telas existentes en la Cúpula y el Altar (en rojo), durante las mediciones que se llevaron a cabo en mayo.

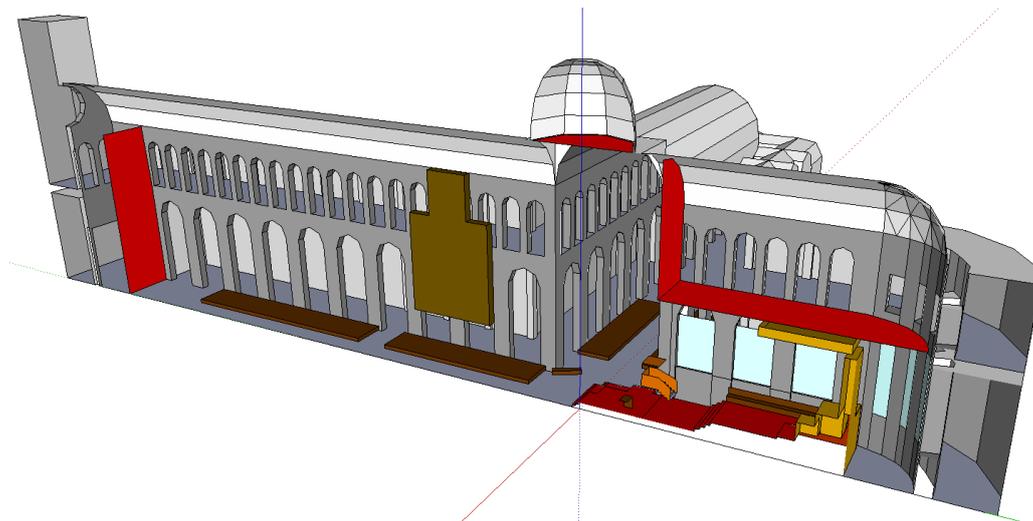


Figura 11 – Modelo 3D

Una vez obtenido el modelo arquitectónico 3D simplificado, se ha realizado la importación del mismo al software de simulación EASE, con objeto de disponer de un modelo geométrico (con la asignación de materiales acústicos a las superficies), que será posteriormente validado a partir de las medidas realizadas in situ.

A modo de primicia, en la Figura 12, presentamos el modelo geométrico de la Catedral en EASE, que será motivo de futuras publicaciones en las que expondremos los resultados del procedimiento de validación que se ha seguido.

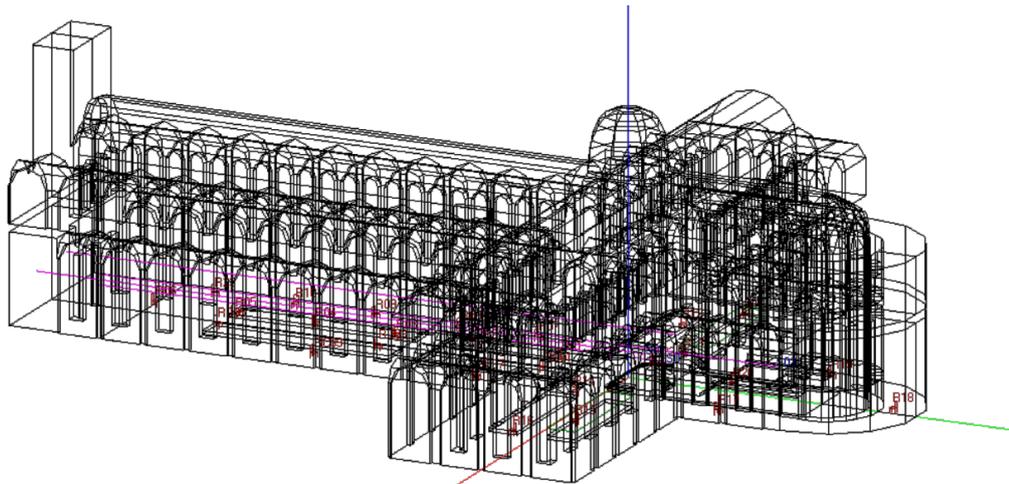


Figura 12– Modelo EASE

Para la validación de modelo geométrico en EASE, seguiremos diferentes pasos:

- Recopilación bibliográfica, con ayuda de referentes bibliográficos que se basan en estudios acústicos de catedrales similares, se escogen los coeficientes de absorción de materiales que se encuentran en la catedral y así poder estudiar su comportamiento.
- *Validación inicial:* empleando criterios de la teoría estadística, se realizará una primera validación del tiempo de reverberación (Eyring), comparándolo con el tiempo de reverberación medido in situ (valores promedios). Este procedimiento podrá conllevar la modificación de los coeficientes de absorción de algunos elementos constructivos de la catedral, con respecto de los obtenidos en el primer paso.
- *Validación de parámetros acústicos mediante la teoría estadística:* se comparan los valores de los parámetros que el software calcula mediante teoría estadística (valores promedios). Se obtiene una calificación mediante la distancia en JND con respecto de los parámetros medidos.
- *Segunda validación:* empleando criterios de la teoría geométrica: se realiza una validación del tiempo de reverberación a partir de la simulación de la respuesta impulsiva calculada mediante un método híbrido (AURA), comparándolo con el tiempo de reverberación medido in situ (valores promedios). En este paso es posible que haya que tomar la decisión de modificar levemente el coeficiente de absorción de algún elemento constructivo e incluir características específicas de difusión en algunas superficies.
- *Validación de parámetros acústicos mediante la teoría geométrica:* se comparan los valores de los parámetros que el software calcula mediante simulación de la respuesta impulsiva calculada mediante un método híbrido (AURA), (valores promedios). Se obtiene una calificación mediante la distancia en JND con respecto de los parámetros medidos.
- *Validación punto a punto:* se realiza un estudio en detalle del comportamiento local en cada posición fuente-micrófono, empleando AURA.

4 Conclusiones

Para nosotros ha sido una experiencia muy positiva unir esfuerzos de varios equipos de investigación de diferentes universidades para el análisis de las características acústicas de la Catedral de Santiago. También en trabajos futuros esperamos poder comparar los resultados de las mediciones de los otros equipos, así como modelos geométricos de la Catedral utilizando diferentes herramientas de simulación por equipos de trabajo.

En cuanto a valores, conviene recordar como se dijo al inicio de la ponencia, la situación de restauración que se produjo durante la ejecución de las medidas, que pueden alterar los valores reales de los parámetros acústicos obtenidos.

Se podría decir que el tiempo de reverberación de la Catedral no es excesivamente elevado (4,3-4,4 s), mientras que tanto los parámetros energéticos como la inteligibilidad son bastante pobres, a excepción de la zona de altar-coro, que por su especial configuración y estado de rehabilitación son valores bastante aceptables.

Se ha optado por dividir el estudio de la Catedral en cuatro espacios diferenciados (nave central, crucero, altar-coro y deambulatorio), dado que los resultados de los parámetros obtenidos son muy diferentes entre ellos.

Como futuras líneas de trabajo tenemos la comparación de medidas entre los diferentes equipos y validación de modelos geométricos con distintas herramientas de simulación. También la realización de una tercera campaña de medición en la Catedral cuando finalicen los trabajos de a finales de 2019.

Agradecimientos

A todos los autores de este trabajo por acompañarme en esta aventura alucinante. A la Fundación Casa da Fábrica (Catedral de Santiago) por brindarnos el acceso para el estudio acústico y archivístico de este magnífico lugar. A Federica Ciani y Mariene Benutti, por su colaboración en las campañas de medida. A los equipos de la Universidad de Sevilla, Politécnico de Bari y Universidad de A Coruña. A Jorge Fernández (B&K) y Javier Casajús (ETSIT-UPM) por el préstamo desinteresado de algunos equipos de medida. A Janet Gonzalo por su trabajo desinteresado en las versiones del modelo de SketchUp desarrolladas. A todas las personas que han creído en nosotros y han hecho posible que este proyecto personal, para muchos de nosotros, se haya podido llevar a cabo.

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] Álvarez-MoralesL, GirónS, GalindoM, ZamarreñoT. Acoustic Environment of Andalusian Cathedrals. Build. Environ. 2016; 103:182-192.
- [3] Keneth J. Conant, “Arquitectura Románica da catedral de Santiago de Compostela”, Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia, Santiago (1983).
- [4] Miguel Sobrino, “Catedrales: las desconocidas biografías de los grandes templos de España”, La Esfera De Los Libros (2009).
- [5] A. Moralejo, C. Torres, J. Feo, ed. X. Carro Otero, “Liber Sancti Iacobi - Codex Calixtinus”, Xunta de Galicia, ISBN 84 453 3132 9 (2001).
- [6] UNE-EN ISO 3382-1 “Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos”, Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2010, 2012).
- [7] ISO 18233, Acoustics-applications of new measurement methods in building and room acoustics, Geneva, (2006).
- [8] Francesco Martellotta, “Guidelines for acoustical measurements in churches”, Applied Acoustics Vol 70, pp. 376-389 (2009).
- [9] Suárez, R.; Alonso, A.; Sendra, J.J., “Intangible cultural heritage: the sound of the romanesque Cathedral of Santiago de Compostela”, Journal of Cultural Heritage, Vol.16, pp 239-243, (2015).