

## REVESTIMIENTOS FIJOS Y CONFIGURABLES EN LA ACÚSTICA DE LA CATEDRALES

**Rogelio Ruiz Martínez, Alexander Díaz-Chyla, Antonio Pedrero González, César Díaz Sanchidrián**

Grupo de Investigación de Acústica Arquitectónica. Universidad Politécnica de Madrid  
rogelio.ruiz@upm.es, diazchyla@gmail.com, antonio.pedrero@upm.es, cesar.diaz.sanchidrian@upm.es

### Resumen

Las catedrales góticas, en su máximo esplendor, emplearon diversos sistemas de acondicionamiento para conseguir mejoras técnicas, siendo la modificación de su comportamiento acústico una de ellas. A los elementos fijos como los retablos, las vidrieras y los distintos morteros de revestimiento, se unieron habitualmente elementos configurables como colgaduras, tapices, telares y cuadros, empleados como recurso para la adaptación de la catedral a las distintas celebraciones litúrgicas.

Este artículo estudia la repercusión acústica de los diversos métodos de acondicionamiento empleados en la historia de las catedrales, centrándose en la Catedral de Toledo. Mediante un modelo acústico virtual ajustado con las medidas in situ, se compara el estado actual con el estado a principios del s. XVI y con el del s. XVIII en las configuraciones de liturgia diaria y extraordinaria, comprobándose que los parámetros acústicos de los modelos históricos difieren sustancialmente de los actuales.

**Palabras-clave:** simulación acústica, revestimientos, tapices, catedrales, Toledo.

### Abstract

In the greatest splendor of gothic cathedrals, different conditioning systems were used in order to achieve technical improvements. The modification of acoustic behavior was one of them. Fixed elements as altarpieces, stain glass windows or different types of mortar coatings, were usually accompanied with configurable elements such as hangings, tapestries, draperies and paintings, as means to adapt the Cathedral to the different liturgical celebrations.

This paper studies the acoustic impact of the various conditioning methods used in the history of cathedrals, focusing on the Cathedral of Toledo. A virtual acoustic model is adjusted to on site measurements in order to compare the contemporary setting with the quotidian and extraordinary liturgical configurations at the beginning of 16<sup>th</sup> century and 18<sup>th</sup> century. The results established how deeply the acoustic parameters of the historical models differ from those of the present.

**Keywords:** acoustic simulation, coatings, tapestries, cathedrals, Toledo.

**PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka**

## 1 Introducción

Las catedrales góticas suponen un valioso patrimonio arquitectónico y humano que ha ejercido de centro de dinamización en la evolución de las ciudades, modificándose y adaptándose a las circunstancias de cada momento de la historia y llegando hasta nuestros días en un estado distinto al de su máximo apogeo. Falta de financiación y mantenimiento, errores en los criterios de actuación en las rehabilitaciones o la variación de la imagen colectiva de la catedral, son algunos de los causantes de las alteraciones menos afortunadas, mostrando en muchos casos una versión empobrecida de lo que fue un espacio de enorme complejidad funcional, material, iconográfica y decorativa.

La visión de Viollet Le-Duc, que se impuso a finales del siglo XIX, reclamaba el retorno a una supuesta pureza gótica mediante la “limpieza” de los paramentos para dejar al descubierto la piedra y potenciar la presencia de la estructura portante. La documentación estudiada [1] muestra un concepto de catedral distinto al de esta concepción del espacio. Se tiene constancia de la existencia de numerosos sistemas de acondicionamiento capaces de alterar sustancialmente el comportamiento acústico. En función de su disposición y uso, se pueden clasificar como elementos fijos y configurables, distinguiéndose en los últimos su utilización en la liturgia diaria o en actos extraordinarios.

El objeto central de estudio es la Catedral de Toledo, edificio que partiendo de la estructura funcional y espacial de la Catedral de Santiago de Compostela, se convirtió en el modelo tipológico de la catedral española. Debido a sus dimensiones, a que conserva los elementos funcionales y constructivos originales más importantes y a la abundante documentación existente de sus transformaciones, representa un ejemplo claro de la importancia de los revestimientos fijos y configurables para el acondicionamiento acústico de las catedrales y de cómo sus distintas composiciones y disposiciones alteraban el comportamiento acústico.

### 1.1 Descripción de la Catedral de Toledo

La catedral se sitúa en los terrenos anteriormente ocupados por la mezquita y antes por la iglesia visigoda. Su construcción comienza alrededor de 1226, completándose en lo fundamental a finales del s. XV y experimentando diversas modificaciones y ampliaciones hasta el s. XVIII.

Es un templo de cinco naves, cabecera circular y capillas de diversa naturaleza en el perímetro. En la nave central están la capilla mayor y el coro organizados según el “modo español” [2], es decir con el crucero entre esos dos espacios. Las dimensiones interiores aproximadas de la iglesia sin capillas son 108 metros de largo por 54 de ancho, con nave central de 14,80 metros y laterales de 9,75 metros. El espacio está definido por el escalonamiento de las cubiertas de las naves con una altura interior de unos 31, 19 y 12 metros. El crucero mantiene la altura de la nave central y no sobresale en planta. La estructura está formada por 72 bóvedas, 48 pilares exentos y 40 pilares en el perímetro murario.

La capilla mayor está cerrada en tres de sus caras, casi llenando los intercolumnios. Un impresionante retablo de planta poligonal y cinco calles cierra totalmente el fondo de la capilla. El coro ocupa dos intercolumnios y está delimitado por una construcción muraria de unos 6 metros de altura, con dos órganos cerrando los intercolumnios posteriores.

La estructura principal del edificio es de piedra caliza. Los muros de relleno y las bóvedas están hechos en su mayor parte de mampostería. Todo el interior está revestido con morteros de varios tipos.

La catedral ha experimentado en su historia dos grandes reformas interiores, una a finales del siglo XV promovida por el Cardenal Cisneros y otra en el s. XVIII a cargo del Cardenal Lorenzana. En la

reforma de Cisneros se amplió la Capilla Mayor, se demolieron algunas construcciones existentes en el interior de las naves y se renovaron los revestimientos de la fábrica. En la de Lorenzana se renovaron totalmente los revestimientos de la catedral, se repararon bóvedas y pilares y se modificaron numerosos retablos y elementos decorativos.

## 2 Elementos configurables

Los elementos configurables fueron utilizados en las catedrales tanto como elemento organizador de la liturgia y los espacios, como de elemento transmisor de un mensaje educativo. Se tiene que diferenciar entre elementos configurables para actos puntuales (festividades solemnes, Semana Santa, fiesta del Corpus, etc.) y elementos más permanentes. Entre los elementos configurables, caben destacar los elementos textiles (tapices, colgaduras, recubrimientos de paramentos o lienzos)

### 2.1 Tapices

Se tiene constancia de la aparición de tapices desde el comienzo de la construcción de las Catedrales. En el caso de la Catedral de Toledo, existe inventario de estos al menos desde 1492, llegando a más de 30 elementos principales entre paños y tapices [3]. Muchos de estos elementos desaparecieron posiblemente por deterioro o por su venta, llegando a nuestros días algunos ejemplos. Las dimensiones de los tapices suelen ser de gran formato variable, siendo lo común una dimensión de unos 4x8m. Su ubicación, como en las grandes catedrales centroeuropeas, era principalmente en el intercolumnio de las naves centrales, descolgadas mediante sistemas de sujeción ancladas a las propias columnas o descolgadas directamente de las bóvedas. También se encuentran vestigios de ubicaciones en las paredes de las naves laterales, capillas o en el Altar Mayor. En algunas de las catedrales estudiadas [4], se llegan a superficies de tapicerías superiores a 1.200 m<sup>2</sup>.

La bibliografía al uso muestra la variación del coeficiente de absorción sonora con la separación de los tapices respecto a la pared. A medida que la distancia crece, el coeficiente de absorción aumenta a bajas frecuencias [5].



Figura 1 – Interior de la Catedral de Estrasburgo

### 2.2 Colgaduras

Las colgaduras son piezas textiles, con densidades variables normalmente entre los 150g/m<sup>2</sup> y 300g/m<sup>2</sup> dependiendo de su fabricación, lugar de origen y acabado, que normalmente se colgaban de una

estructura de apoyo sobre los muros o las columnas de las naves, siendo colocados en las festividades mayores o actos de especial transcendencia como la entrada de los reyes a la Catedral de Toledo durante la Edad Media y la Moderna [3]

Las piezas de menor densidad, corresponden a las banderolas y pendones, se solían situar a lo largo de toda la nave central, en las naves laterales y el crucero, como en el caso de los pendones de la batalla de Lepanto en la Catedral de Toledo. Habitualmente se colgaban con sogas desde tornos elevadores situados en el interior de las bóvedas y también desde los balcones del triforio.

Las colgaduras de mayores dimensiones y densidades se empleaban principalmente en festividades mayores. Está documentada la utilización de enormes piezas de tela, creando espacios propios dentro de las catedrales. En la Catedral de Toledo, llega hasta nuestros días la documentación gráfica del Monumento de la Semana Santa, construcción efímera que anualmente se situaba en los pies en la nave central. El espacio se definía con unas grandes colgaduras desde bastidores de gran tamaño, independizando la nave central de las naves laterales y con un enorme dosel descolgado desde las bóvedas. La existencia de este monumento, llamado del Jueves Santo se remonta en sus distintas versiones al menos hasta el siglo XIV, siendo 1955 el año de su última instalación.



Figura 2 – Monumento de la Semana Santa en la nave central de la Catedral de Toledo

### 2.3 Lienzos y recubrimientos textiles

Habitualmente existen grandes lienzos en los muros, en las capillas y en ocasiones en los retablos. Sus propiedades acústicas dependen directamente de las características de los lienzos, de su montaje y de los acabados superficiales de las pinturas. La documentación estudiada [5], muestra valores de absorción que aumentan con la frecuencia.

En algunas situaciones, elementos textiles de mayor densidad que los tapices, recubren elementos arquitectónicos como pilares, altares o frentes de naves. El motivo de estas intervenciones suele atribuirse al acondicionamiento térmico de los espacios, como era habitual en los castillos y palacios medievales, pero una consecuencia directa de esta intervención es la modificación de las propiedades acústicas del lugar, debido principalmente a las grandes dimensiones del recubrimiento y al tipo de material empleado. Existen ejemplos en toda Europa, destacando en España los recubrimientos en la Catedral de Badajoz, actualmente retirados dejando al descubierto los elementos pétreos.

### 3 Revestimientos fijos

Las catedrales góticas sufrieron grandes alteraciones a partir del s. XIX hasta aproximadamente los años ochenta del S. XX, cuando los criterios de restauración basados en el conocimiento, comenzaron a desvelar el delicado equilibrio constructivo que hace que las catedrales hayan pervivido durante siglos. En innumerables casos los paramentos se dejaron sin revestimiento, quedando la piedra al descubierto. En paralelo se inició un proceso de eliminación de muchos de los elementos intrínsecos de la catedral que, como los coros y los tapices, la habían configurado en su larga evolución histórica.

Los elementos que fundamentalmente influyen en el comportamiento acústico del edificio son los morteros de revestimiento en sus múltiples variedades, los retablos tanto los principales como los existentes en las capillas y pilares y las vidrieras en sus diversas dimensiones y sistemas de montaje.



Figura 3 – Retablo de la Capilla Mayor de la Catedral de Toledo

#### 3.1 Morteros de revestimiento

La cal fue el conglomerante más habitual en los revestimientos de la construcción medieval, si bien fueron frecuentes los morteros de yeso y los bastardos de cal y yeso, sobre todo en las zonas de influencia islámica como Toledo [6] [7]. A nivel constructivo es importante señalar que los morteros de cal hacen de capa de sacrificio protegiendo a la piedra mientras dura su proceso de carbonatación, por lo que dado que las catedrales generalmente se construían con piedras blandas de fácil labrado es indudable que en la mayoría de los casos estos revestimientos se extendían por la totalidad de los elementos pétreos interiores y exteriores.

La propiedad más relevante de los morteros de cal a nivel acústico es su alto grado de porosidad abierta que puede alcanzar hasta el 50%, lo que determina elevados coeficientes de absorción acústica, muy superiores a los de los morteros de yeso o cemento [8]. La granulometría de los áridos y la presencia de algunos aditivos condiciona la porosidad abierta del mortero [7] y por tanto su coeficiente de absorción acústica. En las catedrales hay una gama de morteros de revestimiento muy amplia, utilizados en función del nivel de detalle, del grado de protección, la durabilidad y la importancia que se quisiera dar al elemento. En general a mayor calidad y pulido del acabado menor absorción acústica. La eliminación o la sustitución de estos morteros por otros de distinta naturaleza, dadas las enormes superficies en que se aplican, altera dramáticamente la absorción total del recinto, y por tanto

su tiempo de reverberación y demás parámetros relacionados. No obstante cabe destacar que las propias piedras calizas tienen un porcentaje de porosidad abierta elevado, con valores medios de 15-20%, alcanzándose en algunas hasta el 30-35% [9]

La piedra caliza de la Catedral de Toledo está revestida casi totalmente. En pilares y bóvedas se encuentran los revocos aparentemente más porosos. La zona de contacto con el suelo es sin embargo mucho más pulida y se observan también sutiles diferencias en los capiteles y elementos decorativos. Los acabados de los muros son similares a los de pilares y bóvedas, si bien hay una mayor heterogeneidad en las sucesivas capas existentes. La mayoría de las superficies están pintadas al temple.

Los cerramientos de la Capilla Mayor y el Coro, las zonas con mayor concentración iconográfica, están formados por altorrelieves muy complejos con estucos, policromías, patinados y bruñidos de diversa naturaleza, sin duda con un menor grado de absorción y con una elevada dispersión. En el interior del coro predomina la madera para la formación de la sillería y la piedra para el resto, ambos con un elevado nivel de detalle.

El mortero de revestimiento prácticamente en toda la catedral presenta tres estratos correspondientes a tres épocas bien diferenciadas: anterior a 1526, de 1526 a 1775 y posterior a 1775 hasta la actualidad [10]. Las características de estos morteros se describen en la Tabla 1.

Tabla 1 – Características de los morteros en las distintas épocas

Época	Mortero base	Dosificación conglomerante/arena	Aditivos y adiciones	Acabado
Anterior a 1526	Cal con arena silícea	1/3		Temple oleoso de color uniforme con simulación de despiece y policromías, sobre lechada de cal grasa
1526-1775	Yeso con arena caliza	2/3	Fragmentos de teja y cerámicos y fibras vegetales	Temple oleoso de color uniforme con simulación de despiece, sobre lechada de cal
1775-actualidad	Yeso con arena caliza	3/1	Fragmentos cerámicos, fibras vegetales, azúcar, etc.	Temple oleoso de acabado rugoso y color uniforme con simulación de despiece, sobre lechada de cal

### 3.2 Retablos y vidrieras

En las catedrales góticas españolas, los retablos se encuentran en la práctica totalidad de los espacios de celebración. Su estructura formal y material es muy variada, pero en general presentan un nivel de detalle alto que contribuye a la difusión del sonido y en ocasiones, debido a los elementos salientes y las construcciones a modo de dosel, a la reflexión del sonido hacia la zona de los fieles. Originalmente también se situaban en los propios pilares de las naves, retablos de diversa magnitud ligados a altares. En la Catedral de Toledo destaca el retablo de la Capilla Mayor por su riqueza y complejidad extrema.

Las vidrieras son los principales elementos de absorción a bajas frecuencias. Sin embargo y basándonos en el caso de Toledo, con vidrieras de tamaño relativamente modesto engarzadas en celosías de piedra, se pueden distinguir al menos dos tipos de vidrieras con diverso comportamiento acústico en función del tamaño global del elemento, del tamaño de los vidrios y de la proporción entre las superficies de piedra y vidrio de cada elemento.

## 4 Metodología

Se ha elaborado un modelo 3D de la Catedral de Toledo con el estado actual del edificio, incluyendo las capillas y demás volúmenes abiertos al espacio de las naves, para la simulación de su campo sonoro. El modelo virtual inicial se ajusta a partir de las medidas obtenidas in situ mediante un proceso iterativo. Se obtiene así un modelo validado con el que, con las modificaciones oportunas, simular las diversas configuraciones consideradas de revestimientos fijos y configurables existentes en la historia del edificio. Se obtienen los parámetros acústicos más relevantes de cada configuración para posteriormente compararlos y analizar la influencia relativa de cada uno.

### 4.1 Metodología de medida

Las mediciones se han efectuado según el método de respuesta impulsiva integrada, cumpliendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [11]. Se ha utilizado una pistola de fogeo como fuente sonora para excitar el recinto. La respuesta de la sala ha sido registrada y analizada por cuatro estaciones de medida simultáneamente, todas ellas dotadas con el programa de software Dirac y con los transductores correspondientes. Para la situación de fuentes y receptores se han teniendo en cuenta también otras recomendaciones específicamente pensadas para iglesias [12], considerándose asimismo las situaciones correspondientes a las distintas posibilidades litúrgicas y a los usos históricos habituales de oficiantes y fieles en la Catedral de Toledo. Se han realizado un total de 132 medidas correspondientes a 15 posiciones de fuente y a 25 posiciones de receptor. Tanto fuentes como receptores se han situado a 1,50 metros del suelo, altura determinada considerando las personas de pie.

Las medidas se han llevado a cabo con la iglesia desocupada, en horario nocturno, con una temperatura y humedad relativa constantes de 25,5 °C y 20% respectivamente. Se efectuó la medición del ruido de fondo, obteniéndose un nivel sonoro continuo equivalente de 35 dBA. La relación señal-ruido se mantuvo por encima de los 40 dB en todas las bandas de frecuencia relevantes, por lo que los valores medidos se consideran fiables.

### 4.2 Modelo de simulación

El modelo tridimensional, construido con Autocad 2010 y analizado con ODEON 8.5, adopta una geometría regularizada y simplificada respecto al edificio real, basada en la métrica y los planos desarrollados por V. Berriochoa y J. M. Merino [13]. El modelo tiene un volumen aproximado de 120.000 metros cúbicos y está formado por 2.157 superficies de las que el 85% corresponde a la construcción del edificio propiamente dicho y el resto a elementos como retablos, cuadros y revestimientos configurables. Se han definido un total de 33 materiales para 14 elementos constructivos distintos.

El comportamiento del modelo se ha ajustado con la realidad mediante la modificación de los coeficientes de absorción de los materiales principales, de manera que el T30 promedio en las bandas de frecuencia con frecuencias centrales entre 125 y 4000 Hz no difiera en más de un JND (5%) [11] respecto a las medidas realizadas in situ. Inicialmente se ha ajustado el T30 promedio medido y el simulado de cinco puntos receptores representativos distribuidos por los espacios principales de la catedral y con la fuente en el altar mayor. Posteriormente se ha comprobado que los valores de C50 y C80 de los puntos uno por uno están dentro del margen de  $\pm 1$  JND, por lo que se puede certificar el buen funcionamiento del modelo.

Los cálculos se han realizado utilizando 78.946 rayos, un orden de transición de 2 y una duración de la respuesta impulsiva de 5 s.

El criterio de asignación de propiedades a los materiales ha sido el siguiente:

1. Estudio en profundidad de los tipos y características de los materiales actuales de la catedral y de los existentes en el pasado, en especial de los morteros de revestimiento, a partir de la documentación existente y de la observación in situ.
2. Asignación de coeficientes de absorción, dispersión y transparencia de acuerdo a la abundante literatura existente [14] [15] [16]..., respectivamente según los materiales y sistemas constructivos, la profundidad y dimensión de las irregularidades y el grado de perforación o transparencia al sonido.
3. Corrección de los coeficientes de absorción en función de la relación ponderada entre la superficie real de cada elemento y la reflejada en el modelo [16]
4. Modificación iterativa de los coeficientes de absorción de los materiales principales según los criterios de ajuste del modelo.

Tabla 2 – Coeficientes de absorción ajustados de los principales materiales utilizados en los modelos, definidos según el criterio descrito anteriormente

Material	Área (%)	Coeficiente de absorción por bandas de octava (Hz)						Dispersión
		125	250	500	1000	2000	4000	
<b>Elementos fijos</b>								
Bóvedas lisas	14,2	0,05	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,15
Bóvedas detalle	1,8	0,05	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,20
Bóvedas relieve	1,7	0,07	0,11	0,14	0,15	0,14	0,13	0,50
Galerías triforio	5,6	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,14	0,20
Muros lisos	24,8	0,06	0,06	0,06	0,07	0,09	0,14	0,20
Muros detalle	2,2	0,09	0,09	0,08	0,09	0,12	0,15	0,30
Muros relieve	4,3	0,03	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06	0,60
Órganos	0,9	0,53	0,50	0,57	0,62	0,60	0,60	0,50
Pilares adosados	2,7	0,09	0,09	0,08	0,09	0,12	0,15	0,60
Pilares exentos	12,3	0,09	0,09	0,08	0,09	0,12	0,15	0,45
Pilares acabado pulido	2,1	0,06	0,08	0,08	0,09	0,09	0,07	0,45
Retablos decorados	1,5	0,48	0,45	0,51	0,54	0,40	0,36	0,50
Solado naves y capillas	15,9	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,10
Vidrieras grandes	2,1	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,20
Vidrieras pequeñas	2,4	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04	0,40
<b>Elementos configurables</b>								
Lienzos	0,2	0,02	0,01	0,02	0,12	0,21	0,44	0,05
Tapiz adosado a pared	0,1	0,10	0,14	0,28	0,51	0,54	0,58	0,05
Tapiz suelto	1,6	0,06	0,22	0,41	0,61	0,66	0,60	0,05
Cortinas Monumento S.Santa	2,5	0,04	0,23	0,14	0,57	0,53	0,40	0,05
Banderolas	1,2	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40	0,05
<b>Hipótesis anterior a 1526</b>								
Bóvedas lisas	14,2	0,08	0,13	0,17	0,25	0,28	0,20	0,15
Muros lisos	24,8	0,11	0,18	0,20	0,21	0,22	0,20	0,20
Pilares exentos	12,3	0,14	0,24	0,23	0,28	0,26	0,20	0,45



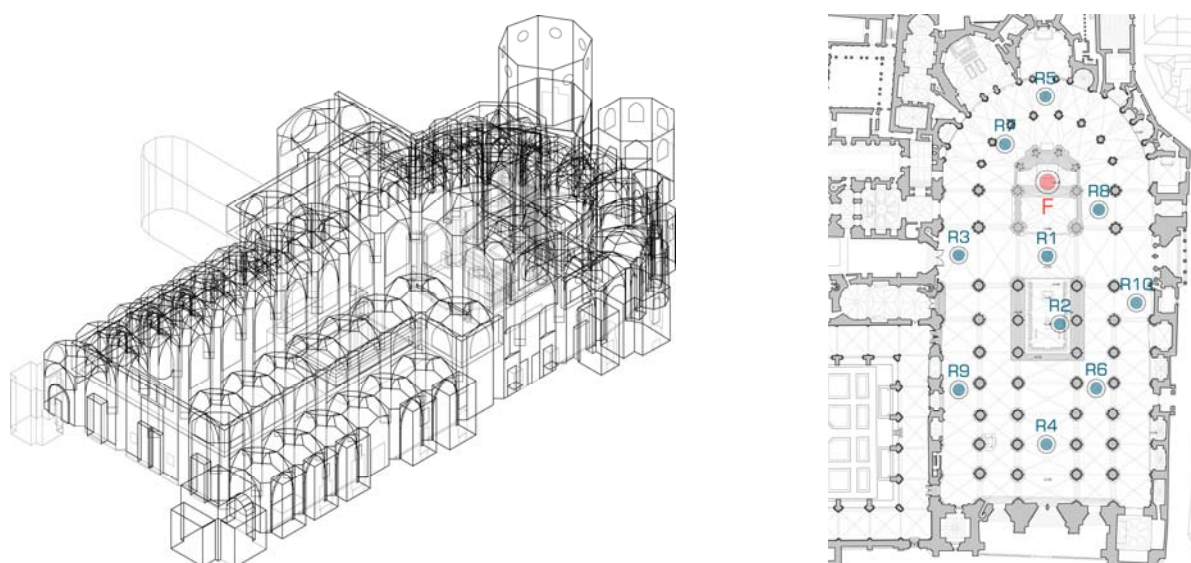


Figura 4 – Modelo 3D de Autocad y planta con localización de la fuente y receptores considerados

### 4.3 Configuraciones analizadas

Se han establecido cinco casos de estudio con los que se relacionan las variables consideradas:

- C1. Estado actual, prácticamente igual al estado a finales del s. XVIII en cuanto a revestimientos fijos.
- C2. Estado f.s. XVIII con hipótesis de revestimientos fijos y revestimientos configurables de uso diario.
- C3. Estado f.s. XVIII con hipótesis de revestimientos fijos, revestimientos configurables y monumento a la Semana Santa como caso de liturgia extraordinaria.
- C4. Estado f.s.XV-1526 con los elementos principales de la iglesia ya construidos e hipótesis de revestimiento de mortero de cal.
- C5. Estado f.s.XV-1526 con hipótesis de revestimiento de mortero de cal, revestimientos configurables y monumento a la Semana Santa.

## 5 Resultados y discusión

El comportamiento acústico de la Catedral de Toledo se ha caracterizado con los parámetros T30, C50, C80 y STI para las distintas configuraciones, por considerarse los más adecuados para ofrecer una visión general respecto a sus funciones, es decir la palabra y la música. No se pretende tanto determinar la calidad acústica del espacio de acuerdo a los criterios de valoración que se aplican actualmente, como evaluar las diferencias de comportamiento, las posibilidades acústicas y las tendencias de mejora del sonido que ofrece cada configuración. Todas las simulaciones se han realizado con la iglesia vacía.

Los resultados que se presentan son el promedio de los valores de los índices acústicos obtenidos en diez posiciones de medida, representativas de las diferentes zonas de la iglesia. En todos los casos la fuente sonora se ubica en el altar mayor.

Los valores promedio de T30 disminuyen de manera bastante uniforme hacia las altas frecuencias, como es propio de los espacios de gran volumen debido a la absorción del aire y a la escasez de

grandes superficies con absorción a bajas frecuencias. Los modelos con incorporación de elementos textiles, C2 y C3, alcanzan respectivamente una disminución promedio del 16 y el 23% en las frecuencias medias respecto al modelo del estado actual. En los modelos con revestimientos de mortero de cal, C4 y C5, es donde esta reducción es más destacable, llegando respectivamente al 42 y 48% en las mismas frecuencias. Las bajas frecuencias sin embargo presentan disminuciones menos relevantes. En las configuraciones con mortero de cal la importancia relativa de los elementos textiles es inferior a las de los modelos con mortero de yeso.

Tabla 3 – Comparación de los valores medios de  $T_{30}$  (s) en las distintas configuraciones analizadas

Configuración	Tiempo de reverberación $T_{30}$ (s) por banda de octava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
C1. f.s. XVIII $\approx$ Estado actual	6,8	6,6	6,3	5,6	4,2	2,0
C2. f.s. XVIII + revestimientos configurables	6,6	6,1	5,4	4,6	3,6	1,9
C3. f.s. XVIII + r. conf. + monumento S. Santa	6,5	5,5	5,1	4,1	3,3	1,8
C4. f.s. XVIII-1526	5,6	4,2	3,8	3,1	2,6	1,7
C5. f.s. XVIII-1526 + r.conf. + monum.S. Santa	5,4	3,8	3,5	2,7	2,4	1,6

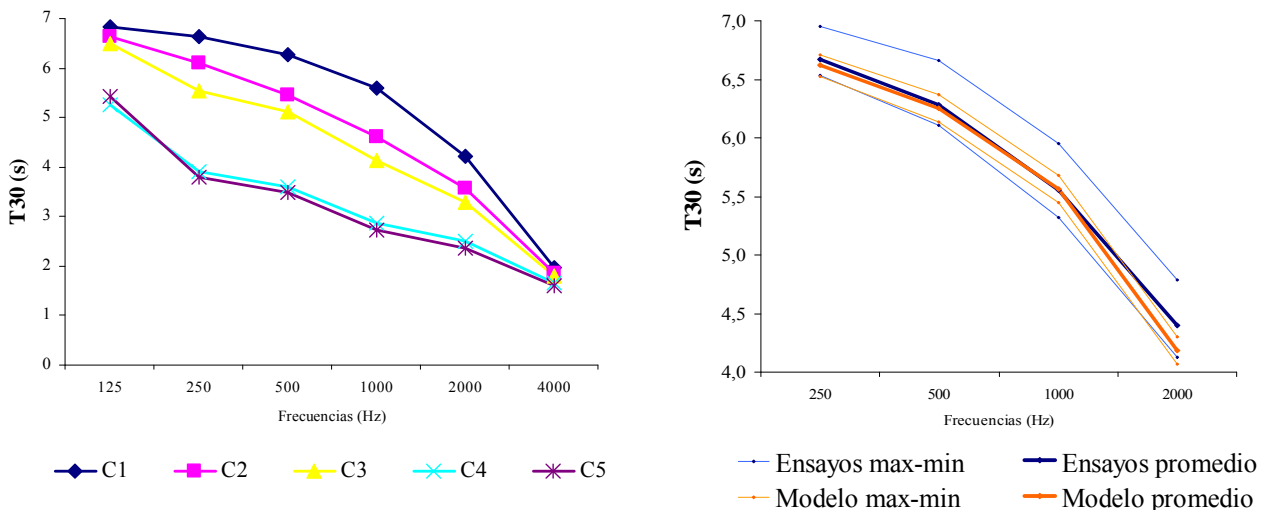


Figura 5. Comparación por frecuencias de  $T_{30}$  en las cinco configuraciones y comparación de los valores promedio, máximos y mínimos de  $T_{30}$  medido y del modelo ajustado.

Los valores promedio de la inteligibilidad de la palabra STI en las distintas configuraciones son:  $STI_{C1}=0.34$ ,  $STI_{C2}=0.35$ ,  $STI_{C3}=0.36$ ,  $STI_{C4}=0.39$ ,  $STI_{C5}=0.40$ . La variación del valor promedio en todo el recinto no es muy notoria, lo que indica que en espacios como este es complicado mejorar la inteligibilidad a escala global.

Existe una gran disparidad de valores de C50 y C80 en los puntos analizados que conduce a un valor medio alto, indicativo de la situación global de la catedral pero que no refleja las condiciones locales de las diversas zonas de la catedral. Estos parámetros no varían en las distintas frecuencias con signo uniforme entre las configuraciones C2 y C3, a pesar del aumento de absorción, sino que mejoran a medias y altas frecuencias y aunque de forma poco significativa, empeoran a bajas frecuencias.

C50 mejora globalmente con el aumento de la absorción acústica, aunque parece existir un límite a la mejora debida a los textiles dada la escasa variación de los valores entre las configuraciones C2 y C3. El cambio de mortero de revestimiento mejora claramente C50, en particular a frecuencias medias.

En cuanto a C80 la influencia de los textiles tampoco es muy destacable en la mejora de los casos sin revestimientos configurables C1 y C4. La mejora del comportamiento de C80 debida al cambio de mortero es muy similar a la ocurrida en C50.

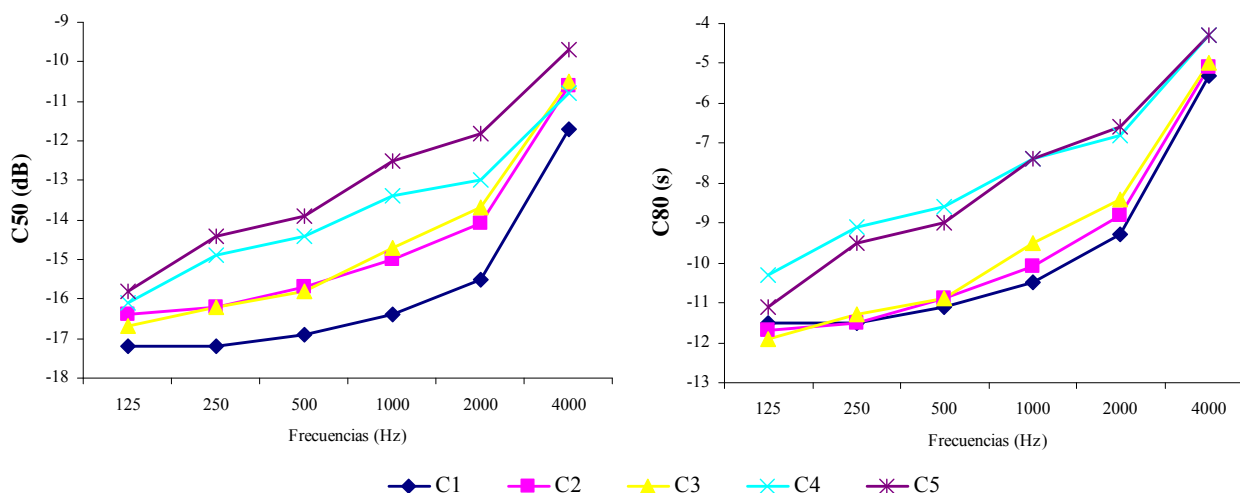


Figura 7. Comparación por frecuencias de C50 y C80 de las cinco configuraciones

## 6 Conclusiones

Este trabajo muestra la influencia de los revestimientos fijos y configurables en la acústica de los grandes espacios catedralicios desde una perspectiva histórica. Los revestimientos analizados en la Catedral de Toledo definen un espacio con unas condiciones acústicas globales, especialmente del tiempo de reverberación, muy diferentes a la idea habitual del sonido de las catedrales góticas.

El modelo virtual para simulación se ha podido ajustar y validar a partir de los ensayos realizados en la catedral. La dificultad de medir in situ la absorción de elementos no existentes en la actualidad en el interior de la catedral como los tapices y demás elementos textiles y la simplificación de su modelización virtual dejan todavía un alto grado de incertidumbre en cuanto a su comportamiento real.

La influencia del cambio de los morteros de revestimiento es obvia dada la enorme superficie que ocupan y también aquí es complicado evaluar con precisión su repercusión real. No obstante se ha comprobado, a partir de la composición y porosidad de los distintos morteros empleados, que existe una clara diferencia en la absorción acústica de los revestimientos empleados en la historia.

La reducción del tiempo de reverberación observada acercaría las condiciones de la iglesia a los márgenes aceptables para la música, más aún una vez ocupada por personas, si bien los parámetros promedio de C50 y C80 de los casos estudiados están lejanos de los valores considerados adecuados.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Cabildo de la Catedral y su Deán D. Juan Sánchez la concesión del permiso para realizar las medidas en la S.I. Catedral de Toledo y en particular a D. Jaime León, Maestro de Capilla y D. Cleofé Sánchez, Secretario Capitular por el interés y la colaboración mostrados.

Agradecimiento especial para Valentín Berriochoa y José Miguel Merino de Cáceres por poner a nuestra disposición para este trabajo la planimetría en CAD del edificio.

## Referencias

- [1] González, R.; Pereda, F. *La Catedral de Toledo 1549. Según el Dr. Blas Ortiz Descripción Gráfica y Elegantísima de la Santa Iglesia de Toledo*. Antonio Pareja Editor, Toledo, 1999.
- [2] Navascués Palacio, P. *Teoría del coro en las catedrales españolas*. Discurso leído en el Acto de su Recepción Pública como académico de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid el 10 de Mayo de 1998. Lunweg Editores, Barcelona 1988
- [3] Cortés, S. *Tapices Flamencos en Toledo: Catedral y Museo de Santa Cruz*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia. Madrid, 1992
- [4] Martellotta, F.; Cirillo, E.; D'Alba, M.; Gasparini, E.; Preziuso, D. Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during de Baroque period: The effect of festive decorations. *Acoustics 08 Paris*, Paris, Junio 29-Julio 4 2008.
- [5] Martellotta, F.; Castiglione, M. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. *Forum Acusticum 2011*, Aalborg, Junio 27-Julio 1 2011.
- [6] Gárate Rojas, I. *Artes de la Cal*. Instituto Español de Arquitectura y MRRP Universidad de Alcalá, Madrid, 2002
- [7] Alejandro Sánchez, F.J. *Historia, caracterización y restauración de morteros antiguos*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción y Universidad de Sevilla, Sevilla, 2002
- [8] Aydin, A.; Tavukcuoglu, A.; Caliskan, M. Assessment of Acoustical Characteristics for Historical Baths (Hammams) *Acoustics 08 Paris*, Paris, Junio 29-Julio 4 2008
- [9] Menéndez, B.; Ordaz, J.; Alonso, F. Observación del sistema poroso de rocas carbonatadas al microscopio electrónico de barrido. *Estudios geológicos*, 44, 1988, pp. 189-197
- [10] Blanco Mozo, J.L. La restauración como problema. El Arzobispo Antonio Francisco Lorenzana y Ventura Rodríguez ante las reformas de la Catedral de Toledo (1774-75). *Anuario del Departamento de Historia y Teoría del Arte*. Universidad Autónoma de Madrid, Vol. XII, 2000
- [11] 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)
- [12] Martellotta, F.; Cirillo, E.; Carbonari, A.; Ricciardi, P. Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics*, 70, 2009, pp. 378-388
- [13] Berriochoa, V.; Merino, M.; Navascués, P. *La Catedral de Toledo. Obra y fábrica*. Lunweg, 2012
- [14] Zamarreño, T.; Galindo, M.; Girón, S. Simulación acústica y virtualización en recintos de culto. *International seminar on virtual acoustics*, Valencia, Noviembre 24-25 2011
- [15] Álvarez, L.; Alonso, A.; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville. *International seminar on virtual acoustics*, Valencia. Noviembre 24-25 2011
- [16] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am* 126 (3), 2009, pp. 1175-1186