

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

MASTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**ACÚSTICA ARQUEOLÓGICA Y
AURALIZACIÓN DE UN EDIFICIO
PATRIMONIAL, *MISTERI D'ELX* -
BASÍLICA SANTA MARÍA DE ELCHE**

TESIS DE MASTER

Autor:

Francisco García Pardo

Director/es:

D. Francisco Javier Redondo Pastor

D. Alicia Giménez Pérez

GANDÍA, 4 Septiembre 2013

ACÚSTICA ARQUEOLÓGICA Y AURALIZACIÓN DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL, *MISTERI D' ELX* - BASÍLICA SANTA MARÍA DE ELCHE

Autor: Francisco García Pardo

Director1: Francisco Javier Redondo Pastor

Director2: Alicia Giménez Pérez

Resumen

La representación del “Misteri d’ ELX” es el evento que condiciona el calendario de la población de Elche. Es una fiesta nombrada “Obra Maestra del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad” por la UNESCO. La basílica es el escenario donde se desarrolla toda la representación musical. Se ha representado sin interrupción desde el siglo XV, adaptándose a las diferentes construcciones de la iglesia.

El proyecto pretende caracterizar acústicamente la basílica actual, por medio del método de la medición in situ de la absorción de los materiales de la basílica. Este método se utilizó debido a la singularidad de los mismos, así como la imposibilidad de utilizar valores ensayados debido a que se trata de un edificio patrimonial y con unas características muy específicas. Posteriormente, se realizará la simulación y calibración del modelo con las medidas realizadas en la basílica.

Por otro lado, por medio de una hipótesis, se recreará la basílica en su estado anterior al actual, para su posterior simulación y auralización, con las grabaciones realizadas a los cantantes intérpretes del “Misteri d’ ELX”.

Abstract

The representation of the "Misteri d'ELX" is the event that determines the calendar of Elche's population. It's a celebration named "Masterpiece of Oral and Intangible Cultural Heritage of Humanity" by UNESCO. The basilica is the stage where all the musical representation is developed. It has been performed, without interruptions, since the fifteenth century. For this reason, it has been adapted to the different church's constructions.

The project pretends to characterize the current basilica acoustically, by the method of in situ measurement of the absorption of the basilica's materials. This method was used because of the uniqueness of them, and the impossibility of using tested values because it is a heritage building with very specific characteristics. Afterwards, it will be the simulation and calibration of the model with the measurements made in the basilica.

On the other hand, by an hypothesis, it will recreate the basilica in its prior state to the current, for further simulation and auralization, with the singers interpreters recordings of "Misteri d'ELX".

Palabras clave: Acústica arqueológica, Validación simulación, Absorción acústica
Tags: Archaeological acoustic, Misteri d'elx, simulation validation, acoustic absorption.

Autor: Francisco García Pardo email:fran.garcia.pardo@gmail.com
Fecha entrega : 04 septiembre de 2013

ÍNDICE

0.	EXPOSICIÓN DE MOTIVOS	5
I.	OBJETO Y ANTECEDENTES	5
	I.1. Estado del arte.....	5
	I.1.a. La Basílica de Santa María de elche y " <i>El misteri d'Elx</i> "	5
	I.1.b. Simulación acústica	6
	I.1.c. Conclusión al estado del arte.....	6
	I.2. Introducción.....	6
	I.3. Objeto	7
	I.4. Introducción histórica.....	7
	I.4.a. Introducción:.....	7
	I.4.b. La tercera Iglesia:	8
	I.4.c. Hipótesis:.....	8
II.	METODOLOGÍA.....	9
III.	MODELADO 3d	10
	III.1. Autocad	10
	III.2. Sketch Up.....	11
IV.	MEDICIÓN DE LA SALA	12
V.	MEDICIÓN DE MATERIALES	14
	V.1. Resultados medidas día 1 Martes 16 / 07 / 2013.....	16
	V.2. Resultados medidas día 2 Miércoles 17 / 07 / 2013	22
	V.3. Resultados medidas día 3 Jueves 18 / 07 / 2013.....	23
	V.4. Conclusiones Mediciones absorción	27
VI.	SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN.....	28
	VI.1. Primera simulación	31
	VI.2. Segunda simulación	32
	VI.3. Tercera Simulación.....	33
	VI.4. Cuarta Simulación	34
	VI.5. Quinta Simulación	35
	VI.6. Simulación valores experimentales.....	36
	VI.7. Conclusiones simulación.....	37
VII.	SIMULACIÓN DE LA TERCERA BASÍLICA.....	38
VIII.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	40
	VIII.1. Conclusiones	40
	VIII.2. Futuras líneas de investigación	41
IX.	AGRADECIMIENTOS.....	42
X.	BIBLIOGRAFÍA	43

0. EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El presente Trabajo Final de Máster ha sido desarrollado junto al **grupo de investigación acústica de la Universidad Politécnica de Valencia**, cuya máxima responsable es la profesora e investigadora del departamento de física aplicada de la UPV, **Alicia Giménez**. Debido al trabajo de investigación que venían desarrollando en lo relacionado a la acústica virtual en diferentes edificios patrimoniales, pude ayudar al equipo con mi participación y, por consiguiente, desarrollar esta tesina. Este trabajo forma parte de la labor de investigación que se lleva a cabo en dicho Departamento y, que a día de hoy, continúa abierto.

Como Arquitecto Técnico, una de las ramas que más interés despertaba en mí, era la acústica arquitectónica y, dentro de este contexto y, tras cursar el Máster en Ingeniería Acústica y de asistir a las clases de Acústica de Salas impartida por el profesor Francisco Javier Redondo, la simulación y el modelado de salas es la disciplina que me ha movido a la hora de realizar esta tesina.

Mi motivación en este segmento de la acústica se debe a mi asistencia a la **Conferencia** del grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia, del cual he formado parte, y de la Universidad de Valencia de Estudios Generales (UVEG), que se realizó en Noviembre de 2012. Esta conferencia fue expuesta por **Arturo Barba**¹, quien presentó su trabajo acerca de la recreación de los estados previos del **Teatro Principal de Valencia**. Por otro lado, también pude acceder a ver la recreación en 3D de la **Lonja de Valencia**. Por medio de realidad virtual y simulación acústica, en el cual podías desplazarte por la misma y escuchar la música exactamente como sonaría en el lugar en el que el receptor se encuentra.

Todo ello me llevó a tomar la decisión de querer realizar el Trabajo Final del Máster en este campo y, gracias a Alicia Giménez, entrar a formar parte, durante un periodo de tiempo, de su grupo de investigación.

I. OBJETO Y ANTECEDENTES

I.1. ESTADO DEL ARTE

I.1.a. La Basílica de Santa María de elche y “El misteri d’Elx”

La Basílica de Santa María, está ubicada en la plaza del Congreso Eucarístico de la ciudad de Elche, provincia de Alicante (Comunidad Valenciana). Se trata de un edificio en el cual se han realizado varias reconstrucciones a lo largo de su historia y, por consiguiente, alberga estilos diferentes como el *barroco* en la portada principal, el *rococó* en las otras portadas y la girola o, el neoclásico del interior.

El Misteri d’Elx [1], es sin duda el acontecimiento que hace importante a esta Basílica. Se trata de una representación de un drama sacro-lírico religioso que recrea la Dormición, Asunción y Coronación de la Virgen María. Se divide en dos actos que se escenifican cada 14 y 15 de Agosto, en el interior de la Basílica. Se trata de la única obra en su género que ha sido representada sin interrupción hasta la actualidad, superando incluso el impedimento que supuso la prohibición de representar obras teatrales en el interior de las iglesias por parte del Concilio de Trento. Fue el Papa Urbano VIII quien, en 1632, concedió el permiso para continuar con dicha representación. Todo aquel que decida acercarse en estas fechas a esta localidad, se daría cuenta de que se trata de una festividad muy importante para los ciudadanos. La devoción por

¹ http://www.arturobarba.com/el_acustico/conferencias1.html

esta representación se encuentra latente durante esos días, ya que es una tradición desarrollada desde la época medieval como conmemoración a la liberación de la ciudad del yugo musulmán. Aunque la representación se celebre los días 14 y 15 de Agosto, se trata de un trabajo que se madura a lo largo de todo el año para poder, en esa fecha, hacer una representación digna de ser Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO [2].

Se trata de una escenografía teatral de la época medieval, acompañada de una representación musical. Todos los participantes son habitantes del municipio de Elche que, de forma voluntaria, realizan todo el espectáculo.

Es por ello que existe un gran volumen de trabajos relacionados con la Basílica de Elche, así como libros y artículos de la representación.

I.1.b. Simulación acústica

Existen importantes trabajos acerca de la simulación acústica, tanto de edificios existentes como recreaciones de edificios inexistentes. **Deborah Howart & Laura Moretti** realizaron un amplio trabajo en este campo en las iglesias renacentistas de Venecia, dando como resultado su libro *Sound & Space*.

A su vez, existen muchos trabajos relativos a simulación acústica de salas y auralización. Se trata de un fenómeno cada vez más importante y que está cogiendo fuerza, debido a la necesidad de conocer la respuesta impulsiva de las salas y poder integrar la música en/de los entornos virtuales para conseguir escenarios más realistas, no solo visualmente, sino acústicamente.

Uno de los aspectos más importantes a la hora de realizar una simulación, es conocer cuáles son los materiales que integran el volumen de la sala a estudiar, así como las características acústicas de los mismos. Los ensayos que actualmente se conocen para la medición de parámetros acústicos, pueden resultar incompatibles con los materiales que ya se hayan colocados. Existe la excepción de los métodos de medición por medio de sondas que miden la velocidad de la partícula y la impedancia. Este método se encuentra en proceso experimental, ya que no existe aún una normativa de aplicación que lo regule.

I.1.c. Conclusión al estado del arte

Debido a mi interés por el mundo de la acústica y, más concretamente, por la simulación acústica de salas, me puse en contacto con el grupo de **Investigación en Acústica Virtual (UPV-UVEG)**, quienes habían realizado varios proyectos de edificios patrimoniales de la ciudad de Valencia, como la Lonja y el Teatro Principal.

Uno de las investigaciones en las que estaban trabajando era la Basílica de Elche. Hasta el momento, habían medido la respuesta de la sala, así como pasar los planos de la Basílica a autocad. Se trata de un lugar perfecto para desarrollar este tipo de trabajos y por este motivo, inicié mi colaboración con ellos.

I.2. INTRODUCCIÓN

En la localidad de Elche se desarrolla cada 14 – 15 de agosto, el Drama lírico-litúrgico de “*El misteri d'ELX*”, el cual su faceta más importante es la musical, que tiene cantos de clara ascendencia medieval [1]. La importancia para esta localidad y el hecho de perdurar a lo largo de los siglos la han convertido en una de las representaciones más prestigiosas de toda España. Lo que hizo que fuese inscrita en el 2008 en la lista representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO [2].

La representación casi íntegramente se realiza en la Basílica de Santa María, iglesia de estilo principalmente barroco que es la última de una sucesión de iglesias construidas en el mismo lugar que ésta pasando por diferentes estilos y formas.

La acústica de la iglesia es primordial para el desarrollo de “*El misteri d'ELX*”, se trata de un entorno perfecto para la representación de ese tipo de música.

La recreación de una iglesia que fue destruida y que no se puede conocer los detalles de ella, es muy difícil ya que los únicos conocimientos que tenemos son geométricos y muy pocos sobre materiales. Pero una simulación acústica de ella nos puede dar a conocer características significativas.

Por lo que el estudio acústico de dicha basílica, así como la recreación de los estados previos de la basílica y su simulación, es un proyecto que relaciona la historia de una tradición centenaria con la teoría de la acústica de salas.

1.3. OBJETO

El objeto de la presente tesina es conseguir la recreación acústica de la basílica que desapareció para dar lugar a la actual basílica. Se trata de una basílica derruida hace cerca de 500 años por lo que la búsqueda información acerca de sus características es uno de los objetivos principales que se contemplan. A su vez lo que se pretende es poder modelar en 3d dicha basílica, para su posterior simulación acústica y su auralización. Para ese fin se parte del conocimiento del estado actual de la basílica, de la cual es posible recrear de forma exacta su volumetría así como conocer sus características acústicas. Y poder validar una simulación por medio de los materiales que actualmente están colocados en la basílica.

Conociendo estos materiales, utilizarlos como base para la simulación del estado anterior. Y poder recrear a través del estado actual un estado previo de la basílica.

Con estas simulaciones es posible, por medio de la grabación de los cantantes, la recreación acústica de estas grabaciones en la basílica anteriormente simulada. Y poder escuchar una representación de “*El misteri d'Elx*” como si se estuviese en esa basílica derruida hace 500 años.

1.4. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

1.4.a. Introducción:

La basílica de Santa María ha pasado por varios estados de construcción, todos localizados en el mismo solar, el más antiguo es una mezquita, cuando la ciudad era una población musulmana, que según cuenta la tradición, *Jaume I el conqueridor* en 1265 tras tomar la ciudad consagro dicha mezquita para el culto cristiano. Posteriormente esta mezquita se derruyó y se construyo una segunda basílica de estilo Gótico-Catalán que duro hasta 1942 [3].

El estado que nos interesa es el estado Gótico-renacentista, la tercera iglesia, esta se construyo después de un periodo en el cual tras desaparecer la del estilo gótico-catalán, en el cual la ciudad estuvo sin basílica. En 1566 se termino la basílica y la torre de esta misma se termino 10 años después.

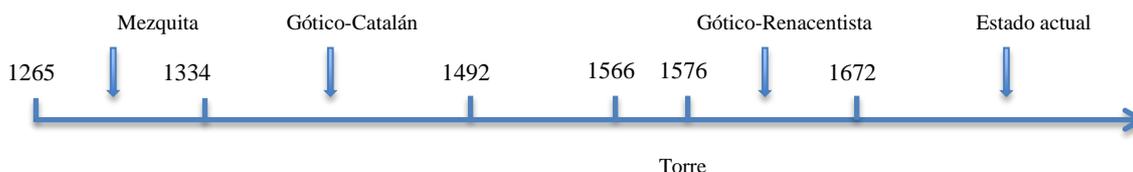


Fig. 1 Cronología

I.4.b. La tercera Iglesia:

No existe mucha información arquitectónica de esta iglesia, los libros consultados en el archivo de la basílica de elche, contemporáneos a esta basílica, el libro de visitas Pastoral 1607-1676, en el cual se recogía lo que el obispo en sus visitas mandaba corregir, aunque la mayoría de las anotaciones eran de carácter económico o de reglamento interno de la iglesia, en este libro sirve para conocer las diferentes zonas de la iglesia, ya que las van describiendo. Así como la disposición de las capillas. [4]

En el libro de Juntas parroquial 1592 - 1699, en el cual se registraban las necesidades de la basílica, en ella hay un informe del arquitecto *Pere Quintana* en el cual habla del estado casi ruinoso de la iglesia en los últimos momentos, previo a las grandes lluvias que provocaron que la iglesia terminara por desplomarse y dar paso a la construcción de la basílica que actualmente conocemos. [5]

I.4.c. Hipótesis:

Cabe destacar que el interés que a despertado esta basílica no ha sido en si su construcción, sino mas bien la representación religiosa que se representa en ella “ el misterio de elche”, representación de la subida a los cielos de la virgen tras su muerte.

Debido a que existe muy poca información de este periodo, unos arquitectos ilicitanos,

escribieron un libro, “ La arquitectura como escenario de *El misterio de Elche*” [6], en el realizan una hipótesis de una posible disposición y forma de esta basílica. Existen varias basílicas contemporáneas a esta en la zona de levante valenciano, y todas ellas comparten cualidades muy similares y representativas de la época renacentista en la que se construyo.

Para realizar una hipótesis de la forma, se basan en unos documentos en los cuales se conoce que un año después de derruirse la tercera basílica, debido a las lluvias, ya se habían construido las paredes de lo que será la basílica actual (los muros de la nave principal).

En la época de la construcción, los medios eran meramente humanos, por lo que la construcción de una gran basílica requería mucho tiempo, el primer paso de la construcción es el movimiento de tierras, gran cantidad de metros cúbicos, y la posterior cimentación. La nueva basílica en escasamente un año ya tenia construidos los muros perimetrales, por lo que da ha entender que la basílica actual reciclo las cimentaciones de la construcción previa, por lo que la basílica renacentista que nos interesa tendría las dimensiones de la nave principal de la actual.

Esa hipótesis en planta, en altura se trataba de una iglesia muy esbelta, como recogen en el libro anteriormente nombrado, *Cristóbal Sanz* , cronista de la época, ponía énfasis en sus palabras al referirse a santa María de elche “ *tan alta que causaba espanto y asombro a los forasteros; parece que nuestra señora la sustenta, para que allí se celebre su muerte y Ascensión a los cielos. No se halla en la cristiandad otra fabrica como esta iglesia, la cual se acabo en el año 1576*”.

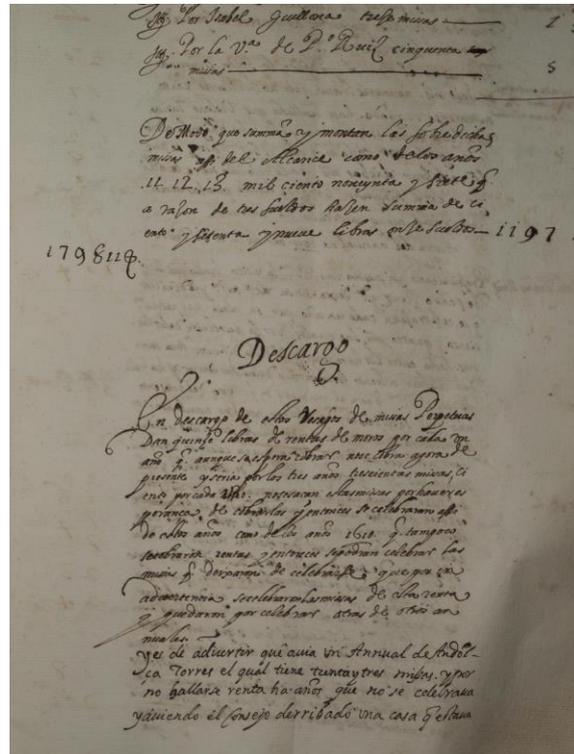


Fig. 2 Libro de visitas

Por lo que las proporciones de la basílica serán iguales que la actual, además existen documentos de los cuales sabemos que todo el escenario y material de representación del misterio era el mismo. Por lo que se puede entender que tendrá las mismas proporciones ya que todo el escenario valdría para ambas basílicas.

A partir de este conocimiento, sería un punto de comienzo para empezar a representar la hipótesis de la basílica.

II. METODOLOGÍA

La metodología de la tesina se ha dividido en diferentes fases, la fase de recreación en 3d de las diferentes basílicas, con los planos del estado actual y con la hipótesis sobre la tercera basílica. En ella se ha utilizado software de dibujo, se ha utilizado tanto Autocad como Sketch up. Ambos programas permiten una fácil exportación a software de simulación acústica.

Para la simulación acústica es necesario además de conocer el volumen y estructura de la sala que se va a estudiar, los materiales que se encuentran en los diferentes paramentos. Hay dos opciones que se han seleccionado, la primera es el uso de tablas de ensayos realizado en cámaras o utilizados con anterioridad en otros proyectos, la segunda opción, al tratarse de un lugar singular con unos materiales muy característicos, es posible la medición “in situ” de los materiales por medio del medidor de absorción.

Tras procesar los datos de absorción se procede a usando esos datos comenzar a simular la sala, por medio del programa de simulación B&K Odeon, colocando las fuentes y receptores en los mismos lugares en los cuales se midió con anterioridad.

Para lograr una simulación lo más fiel con respecto a la realidad se utilizara el valor T30 para lograr validar el modelo simulado con respecto a las mediciones.

Una vez logrado la validación del modelo de la basílica actual se utilizaran los materiales para la tercera basílica, para poder conseguir los valores acústicos de la hipótesis.

Con las grabaciones de los cantantes intervinientes en “El misterio de Elche” es posible por medio de la auralización escuchar las voces combinada con la respuesta impulsiva de la sala. Tanto con la basílica del estado actual, así como la de la basílica que le precedió.

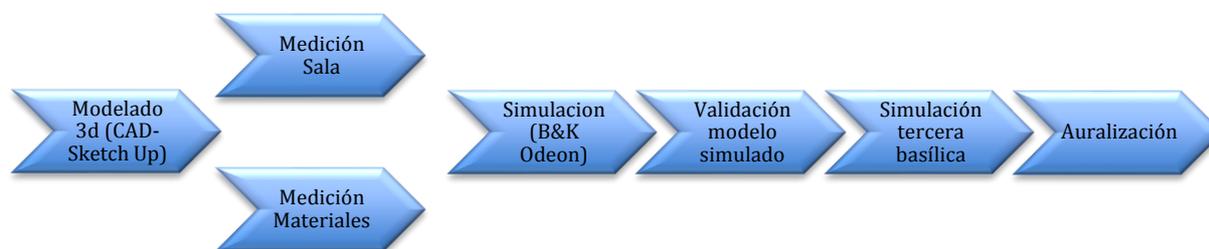


Fig. 3 Esquema de metodología

III. MODELADO 3D

Para el modelado en 3d de la basílica se partió de la base de unos planos, aportados por medio del patronato de “*El misteri d'elx*”, de la misma. Estos planos dibujados en Autocad, permitieron modelar volumétricamente la basílica, según el manual del ODEON [7] recomiendan una superficie mínima de superficies, ya que utilizar pequeñas superficies para mejorar la definición geométrica no servirá para lograr una mayor precisión en el modelo y lo que producirá será un mayor gasto computacional a la hora de realizar los cálculos. Por lo que la superficie mínima que recomienda es una longitud de onda a medias frecuencias (1000hz \approx 0,34 m).

Pero en una sala como es una iglesia que es un volumen rico en detalles y diferentes superficies, no se puede despreciar toda esa contribución que produciría a la acústica de la basílica debido a el scattering que producirá y que se perderá si se diseña una superficie plana o una superficie simple cuando se trata de una superficie compleja. Para esto el programa ODEON recomienda diseñar superficies planas y aplicarle un parámetro de scattering que produzca ese fenómeno de superficies complejas.

A su vez, a la hora de exportar una superficie al ODEON este programa únicamente trabaja con superficies coplanarias, por lo que las curvas han de aproximarse a una sucesión de superficies planas.

Se ha comprobado que para la posterior simulación acústica no es necesario un número muy elevado de superficies ya que es más recomendable usar modelos simplificados para ese fin. [8][9].

III.1. AUTOCAD

En autocad para poder realizar la posterior exportación y que las superficies sean reconocidas por el ODEON han de ser superficies denominadas “3dface” estas superficies son de 4 vértices como máximo por lo que limita mucho las superficies y genera un número elevado de superficies para un modelo simple. Además del problema de la visualización a la hora de trabajar en el dibujo, y la limitación en el número de vértices, necesita que todas los vértices coincidan de forma exacta con el de la siguiente cara para generar un volumen cerrado.

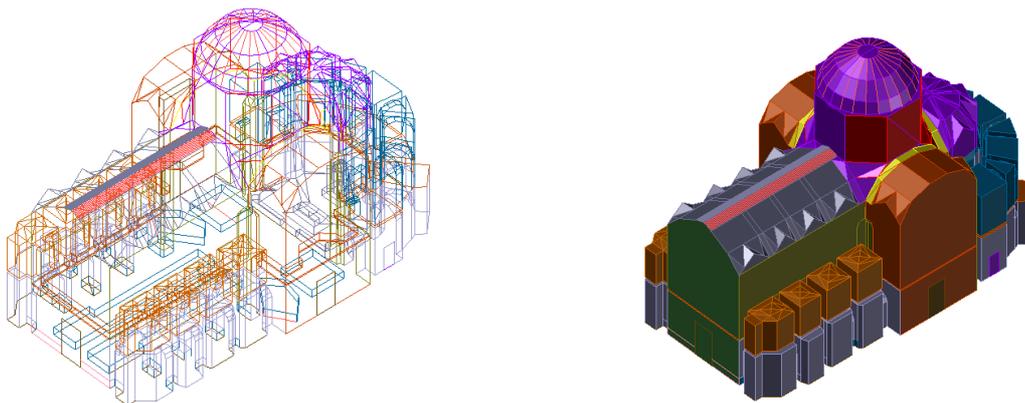


Fig. 4 AUTOCAD - Estilos visuales wireframe y shaded. Santa María de Elche

III.2. SKETCH UP

Odeon tiene un plugin para poder exportar desde Sketch Up, a diferencia de Autocad es posible dibujar con solidos así como dibujar de forma mucho mas intuitiva, al igual que en otros programas de dibujo, permite distribuir en diferentes capas que son exportables al Odeon para posteriormente asignar características acústicas a dichas superficies. Una de las características más reseñables es la capacidad de dibujar una superficie de más de cuatro aristas, por lo que es mucho más cómodo de dibujar superficies complejas, sin la necesidad de triangular. Por lo que reducirá el número de caras del modelo y así el tiempo de cálculo del programa de simulación.

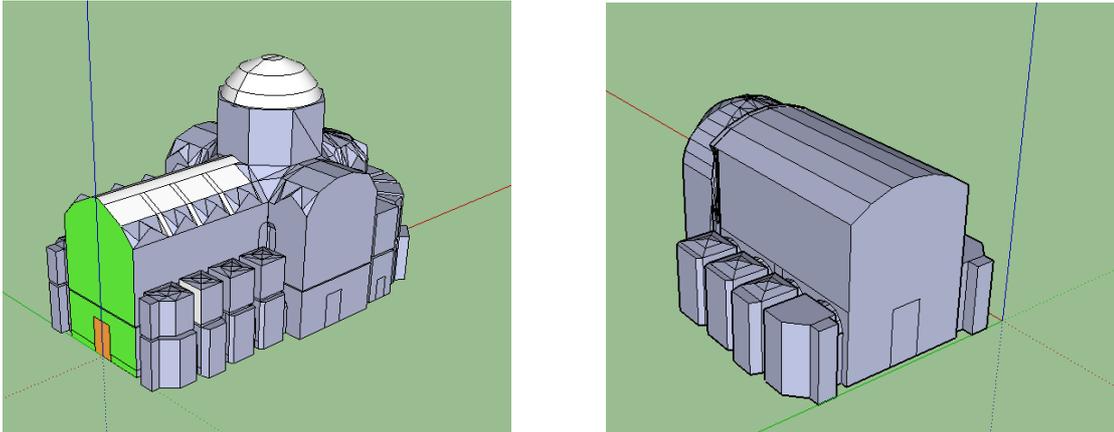


Fig. 5 SKETCH UP - Estado actual y previo. Santa María de Elche

Para esta simulación se ha utilizado un número simplificado de superficies para los dos estados.

ESTADO	Nº Superficies	m ²
Previo	496	3879,5
Actual	1461	14846,3

Tabla 1: Tabla de superficies

IV. MEDICIÓN DE LA SALA

Para la validación las medidas realizadas con anterioridad en la basílica de Santa María y cedidas por el grupo de investigación en Acústica virtual (UPV – UVEG) se realizaron con una fuente omnidireccional (dodecaedro) y con el programa “Winmls” se realizaron las grabaciones así como el procesado y la extracción de los valores característicos de la sala.

A continuación se especifican los puntos de medida.

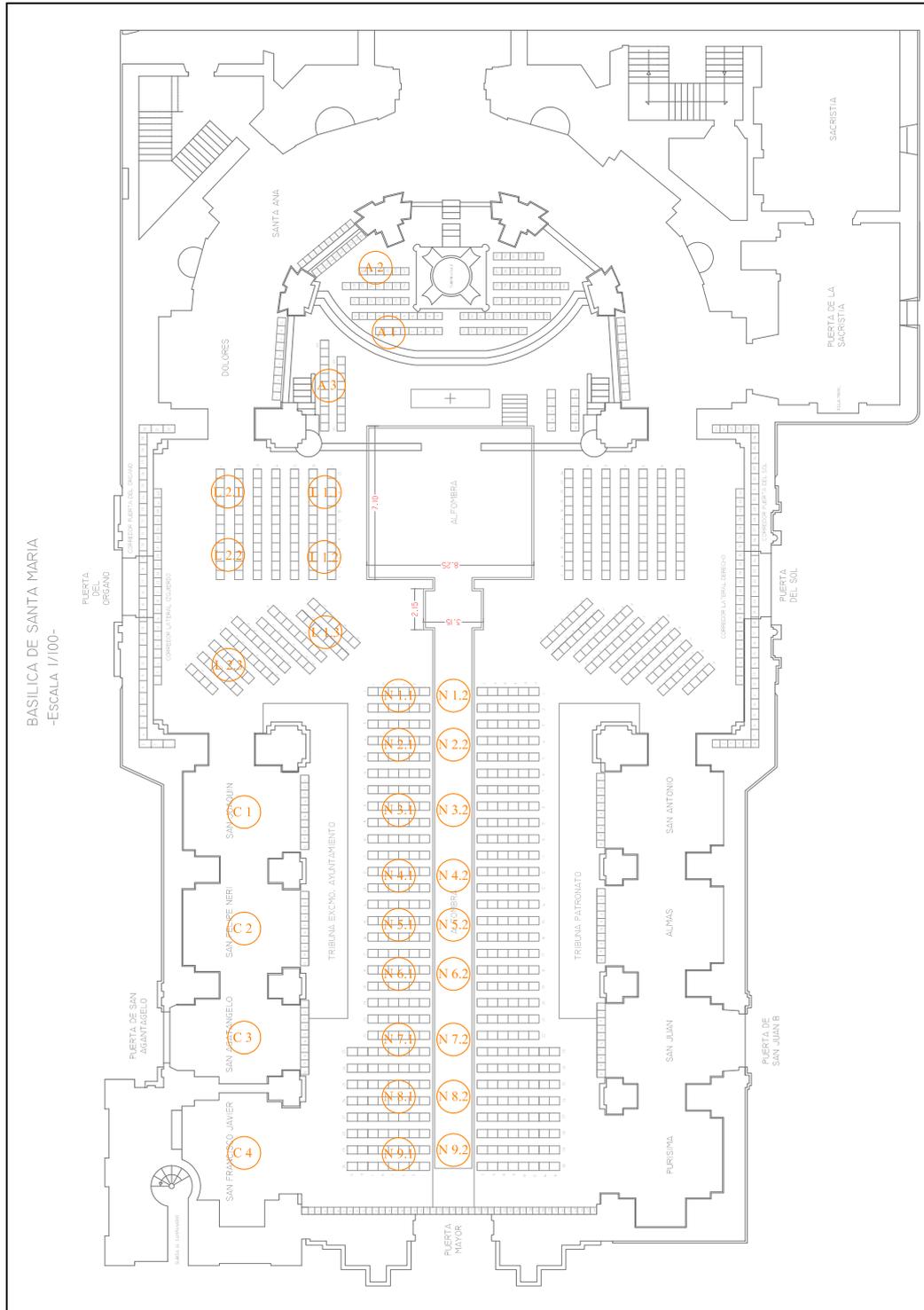


Fig. 6 Puntos de medida

Puntos medida	125	250	500	1000	2000	4000
N1_2	7,83	7,49	6,79	5,99	4,87	3,54
N1_1	7,59	7,36	6,96	6,07	4,91	3,57
N1_2	7,61	7,25	6,79	5,99	4,85	3,55
N2_1	7,24	7,34	6,79	6,06	4,92	3,59
N3_2	7,64	7,38	6,68	6,08	4,94	3,58
N3_1	7,87	7,41	6,70	6,08	4,93	3,61
N4_2	7,72	7,20	6,83	6,03	4,91	3,66
N4_1	7,34	7,16	6,79	6,11	4,92	3,67
N5_2	7,80	7,16	6,64	6,00	4,87	3,53
N5_1	7,15	7,00	6,70	5,97	4,87	3,60
N6_2	7,45	7,14	6,72	5,97	4,94	3,61
N6_1	7,60	7,15	6,74	5,97	4,88	3,59
N7_2	7,25	7,21	6,73	5,92	4,87	4,00
N7_1	7,54	7,29	6,80	5,98	4,86	3,58
N8_1	7,69	7,14	6,77	6,06	4,91	3,61
N8_2	7,24	7,08	6,73	6,00	4,85	3,61
N9_1	7,48	7,23	6,87	5,95	4,99	3,56
N9_2	7,51	7,15	6,80	6,02	4,94	3,66
C1	7,40	7,24	6,65	5,98	4,80	3,50
C2	7,70	7,06	6,59	5,89	4,79	3,56
C3	7,09	6,73	6,75	6,00	4,87	3,57
C4	7,23	7,06	6,49	6,02	4,87	3,55
L1_1	7,89	7,10	6,49	5,84	4,71	3,38
L1_2	7,44	7,35	6,84	5,98	4,69	3,37
L1_3	7,29	7,01	6,68	6,12	4,81	3,47
L2_1	7,55	7,26	6,69	5,88	4,73	3,48
L2_2	7,27	7,05	6,75	5,95	4,78	3,46
L2_3	7,59	7,16	6,67	5,88	4,77	3,52
A1	7,68	7,12	6,79	5,97	4,88	3,60
A2	7,49	7,23	6,86	6,01	4,94	3,62
Promedio(s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Desviación	21,65%	14,66%	10,04%	6,69%	7,24%	10,64%

Tabla 2: Medidas realizadas in situ

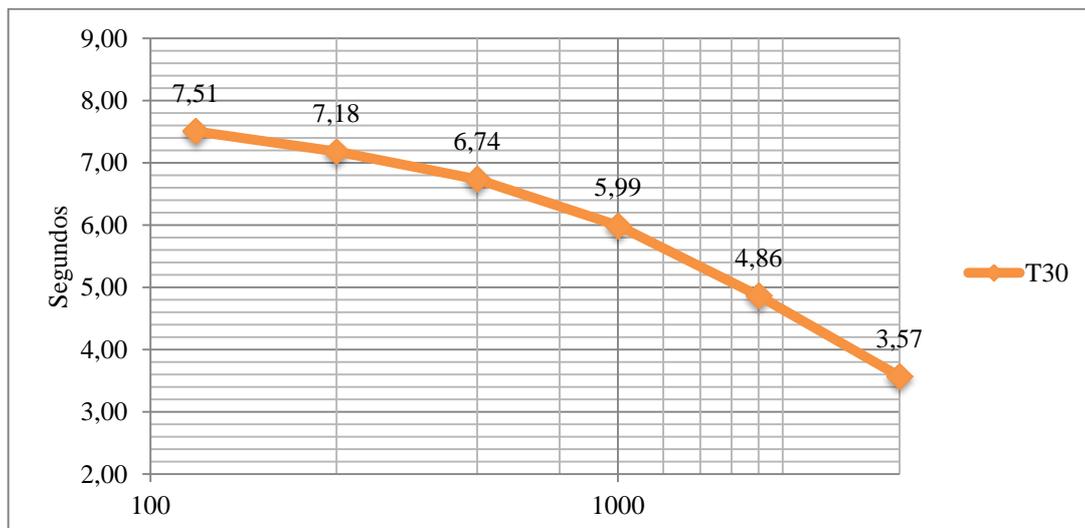


Fig. 7 Curva T30 medido

V. MEDICIÓN DE MATERIALES

Para la simulación acústica hay que tener en cuenta varios parámetros que definirán las características de la sala. Ya hemos hablado de las propiedades geométricas, las cuales se han tenido en cuenta a la hora del modelado de la sala.

Una vez que tenemos la sala definida por sus características volumétricas lo que debemos hacer es la asignación de los diferentes materiales a cada una de las superficies.

Cabe destacar que se trata de un método de medición novedoso, que es de mucha utilidad para su uso en edificios de carácter patrimonial o con materiales característicos. Ya que permite la medición de sus absorciones sin necesidad de tener que realizar una medición en cámara reverberante, cosa imposible para materiales ya colocados. Para el uso de este método de simulación, todo el material me ha sido cedido por el grupo de investigación de acústica virtual (UPV-UVEG). El cual ha estado dedicando mucho tiempo a comprobar el método y ha definir un protocolo de medida que permita una fiabilidad de las medidas, ya que no existe ninguna normativa específica para este tipo de medidas.

Para ello he utilizado un aparato de la marca Microflown Technologies® este aparato esta formado por un micrófono y un Microflown (es un sensor sensible a la velocidad de partícula y a la energía cinética de la onda sonora), por lo que permite medir la intensidad ($I = \frac{1}{T} \int_0^T pu dt$) así como la impedancia acústica ($Z=P/u$) . A partir de estas mediciones se puede conocer la absorción de los materiales (α) in situ, en la localización que se encuentran, sin necesidad de ensayos destructivos, por lo que se puede considerar una alternativa para el tubo de Kundt y a la medición en cámara reverberante. [10]

Con este sistema de medición existen una serie de principales ventajas. [11]

- Medición directa en el escenario de aplicación.
- Rapidez y amplio margen dinámico y frecuencial.
- Alta resolución espacial
- No son necesarias el uso de grandes muestras del material evaluado.
- Baja influencia por el ruido de fondo y reflexiones.
- Medición directa de impedancia, reflexión y absorción.

La medición de la absorción se divide en dos partes. Primero se mide la impedancia de campo libre y posteriormente la impedancia asumiendo que la fuente se comporta como una excitación puntual con incidencia normal y que cualquier diferencia entre el frente de onda incidente y reflejado es causada por el material evaluado, podemos estimar la absorción con la formula:

$$a = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{\frac{Z_m}{Z_{ff}} - 1}{\frac{Z_m}{Z_{ff}} \frac{r}{r+2h} \frac{ik(r+2h)+1}{ikr+1} + 1} \frac{r+2h}{r} e^{ik2h} \right|^2 \quad (1)$$

Símbolo	Magnitud	Unidades
Z_{ff}	Impedancia campo libre	Rayls
Z_m	Impedancia cercana muestra	Rayls
R	Coefficiente de absorción compleja	-
r	Distancia sonda-altavoz	m
h	Distancia sonda-muestra	m

Tabla 3: Magnitudes físicas



Fig. 8 Medidor de absorción

La medida de la absorción in situ será utilizada para la simulación del estado actual. Los materiales medidos que son los principales de la basílica son:

- Piedra de las paredes:

Se trata del material más abundante en la iglesia, a lo largo de toda la basílica se realizaron las medidas en varios puntos, diferenciando en el mismo punto medidas a 1m y a 1,75m ya que la rugosidad y desgaste de ambas era diferente debido al paso del tiempo, aún tratándose del mismo material se esperaba resultados diferentes en ambos casos.

- Mármol del altar

Todo el altar mayor, estaba recubierto en toda su superficie con mármol por lo que fue necesario medirlo, además en el altar hay que tener en cuenta la gran cantidad de relieves, objetos y muchos detalles de ornamento litúrgico. Por lo que habrá que tener en cuenta el scattering que ello provoca en la superficie.

– Suelo nave central

Se trata de un suelo de mármol totalmente pulido que abarca casi en su totalidad la basílica.

– Suelo altar

En el altar para el pavimento se usa el mismo material que utilizado en toda la superficie de la zona del altar.

– Madera banco

Para este material se midió la madera de los bancos como si se tratase de un material aislado. Ocupan una gran superficie dentro de la iglesia y se trata de un material importante para la absorción y el scattering.

Normalmente la medición de los bancos se evalúan como un conjunto de bancos, ya que se representa como una superficie plana en los modelos, debido a que se trata de una geometría complicada y de tamaño reducido para ser considerada como diferentes superficies en la simulación.

– Madera Puertas

Las puertas son de un tamaño importante con respecto al propio tamaño de las paredes. Se encuentran distribuidas, una puerta de doble hoja en la entrada principal y dos puertas de doble hoja del mismo tamaño colocada en cada uno de las entradas del transepto.

Las medidas se realizaron en tres sesiones separadas por un día.



Fig. 9 Procedimiento de medición

El procedimiento a seguir fue, la medida de tres tomas en cada uno de los puntos de medida, posteriormente se realizó la media de las 3 medidas comprobando que la desviación entre ellas no es superior del 5 %.

V.1. RESULTADOS MEDIDAS DÍA 1 MARTES 16 / 07 / 2013

Total de medidas: 89 medidas

– Piedra de las paredes

Parte superior

Hz	Absorción	Desviación
125	0,05	2,58%
250	0,04	2,04%
500	0,02	2,32%
1000	0,04	4,06%
2000	0,01	1,82%
4000	0,00	0,00%
8000	0,03	6,01%

Tabla 4: Parte Superior

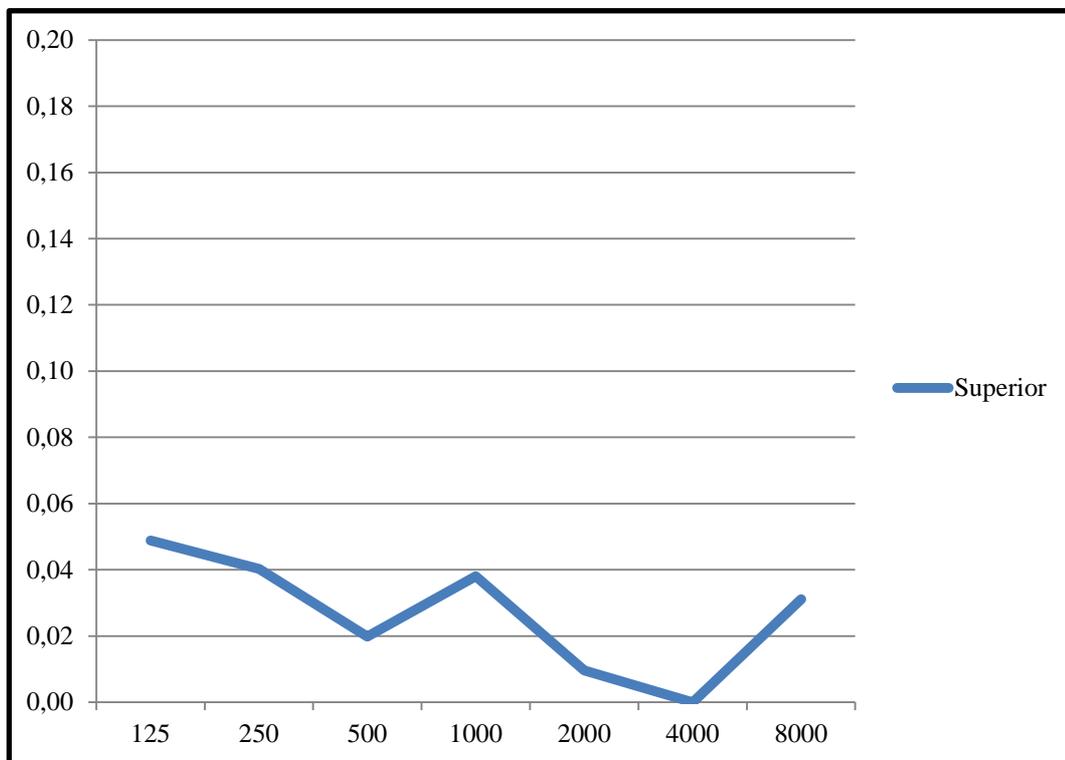


Fig. 10 Gráfico de absorción

Parte inferior

Hz	Absorción	Desviación
125	0,13	1,91%
250	0,16	7,21%
500	0,09	1,73%
1000	0,07	3,72%
2000	0,05	3,67%
4000	0,00	0,00%
8000	0,03	2,11%

Tabla 5: Parte inferior

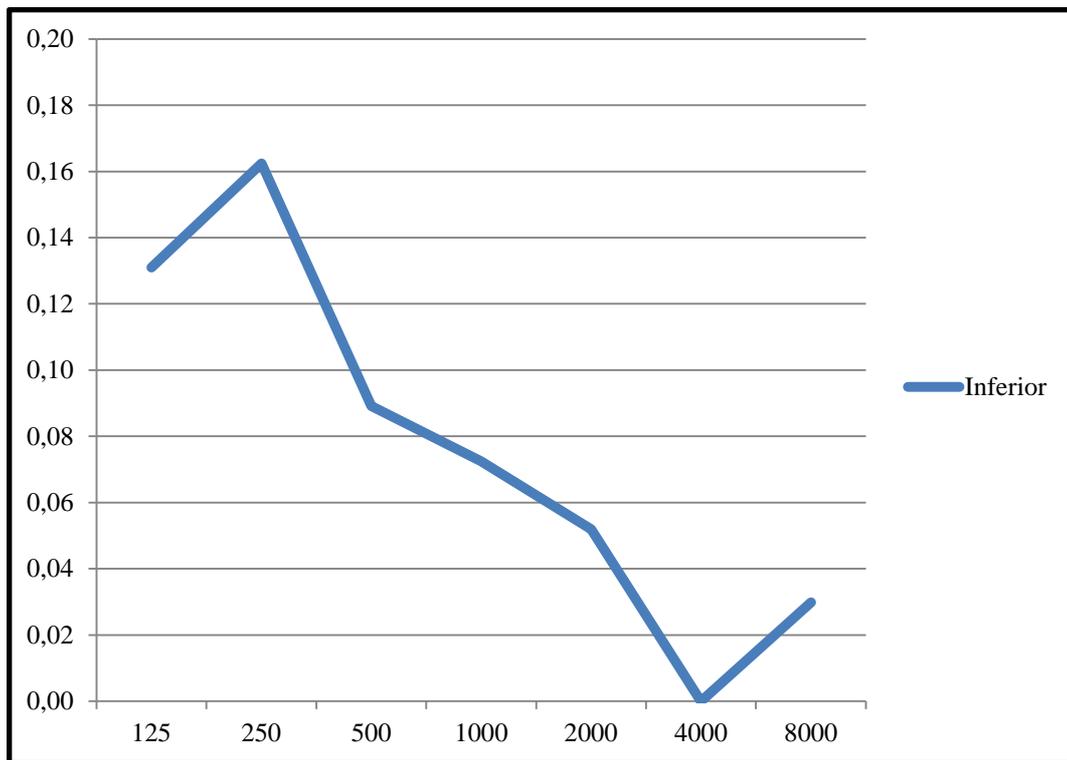


Fig. 11 Gráfico de absorción

– Mármol altar

Hz	Absorción	Desviación
125	0,11	1,90%
250	0,08	0,39%
500	0,11	0,66%
1000	0,12	1,51%
2000	0,03	1,85%
4000	0,07	0,01%
8000	0,11	1,90%

Tabla 6: Mármol altar

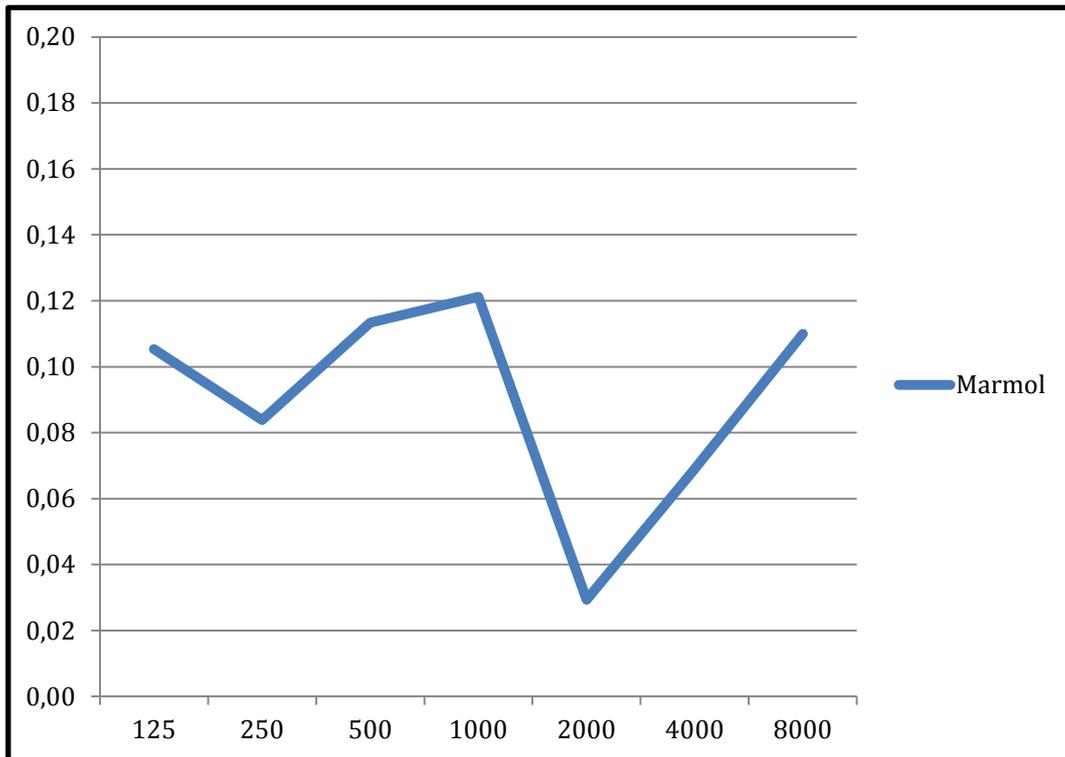


Fig. 12 Gráfico de absorción

– Suelo Nave central

Hz	Absorción	Desviación
125	0,14	0,51%
250	0,11	0,94%
500	0,12	0,33%
1000	0,15	0,24%
2000	0,08	0,77%
4000	0,00	0,00%
8000	0,17	0,10%

Tabla 7: Suelo Nave central

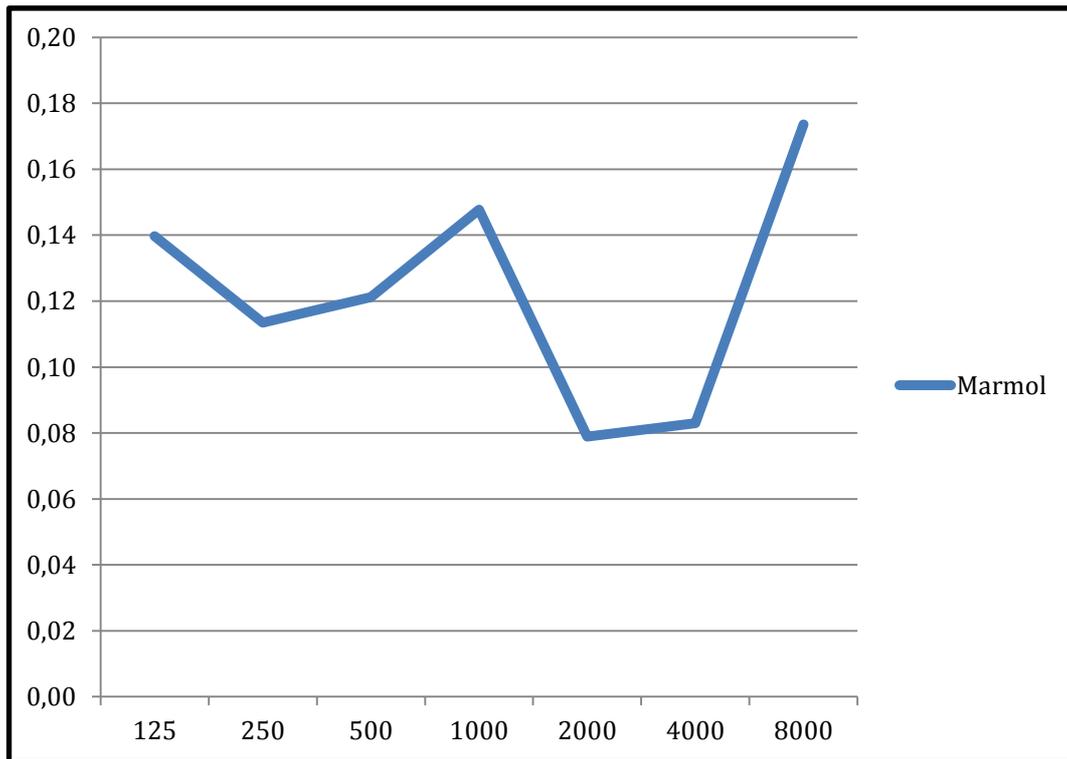


Fig. 13 Gráfico de absorción

– Suelo altar

Hz	Absorción	Desviación
125	0,13	1,70%
250	0,11	0,76%
500	0,12	0,82%
1000	0,14	1,46%
2000	0,07	0,90%
4000	0,03	0,19%
8000	0,13	1,70%

Tabla 8: Suelo altar

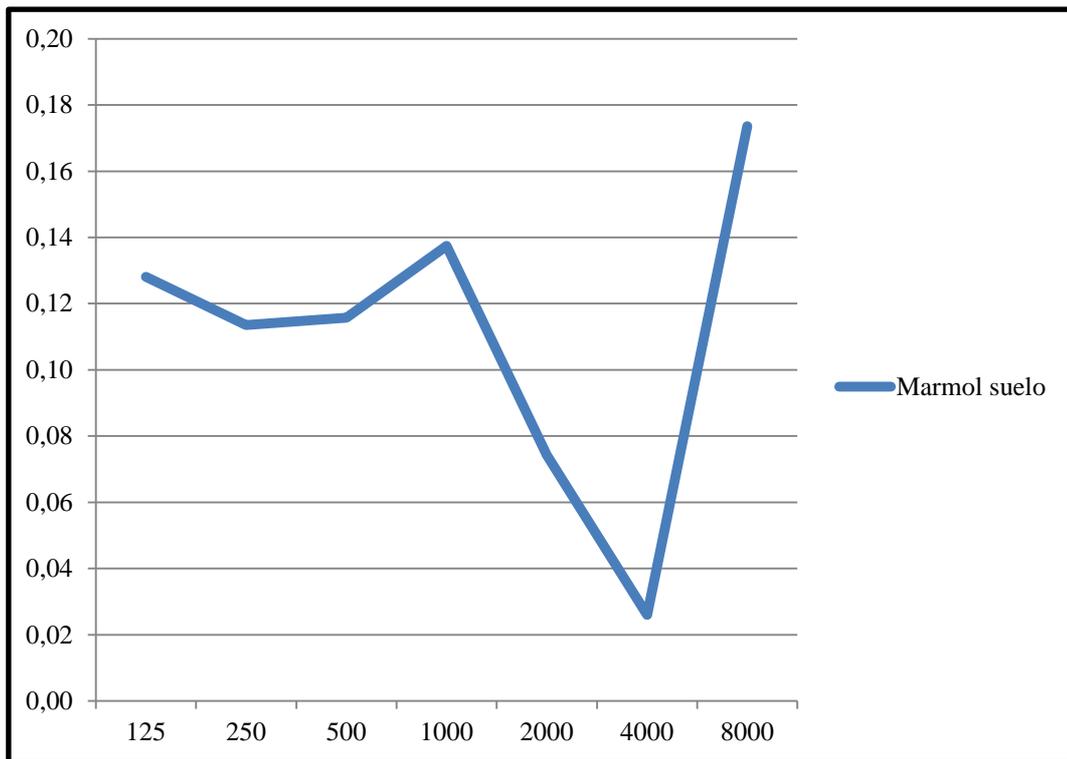


Fig. 14 Gráfico de absorción

– Madera Bancos

Los bancos se midieron como otra superficie, pero al tratarse de una superficie muy pequeñas con bordes libres muy cercano, no se puede considerar como una superficie infinita con respecto a la longitud de onda, por lo que para los valores de absorción y características de los bancos los tomare de datos experimentales, por ejemplo, (Martellotta & Cirillo, Experimental studies of sound absorption by church pews, 2009)[12], (Martellotta, Crociata, & D'Alba, On site validation of sound absorption by church pews, 2011)[13].

Cuando se introducen los bancos en la simulación se representan como una superficie plana, por lo que hace necesario medirlos como tal, se ensaya colocando un grupo de bancos abarcando un metro cuadrado, y esta es la medida que se utiliza para simular.

– Madera puertas

En esta medición tuvimos el mismo problema, se trataba de unas puertas formada por molduras, por lo que para ello se tomara la absorción medido de una puerta de madera y aplicar el scattering provocado por las molduras de la puerta.

V.2. RESULTADOS MEDIDAS DÍA 2 MIÉRCOLES 17 / 07 / 2013

Total de medidas: 105 medidas

En esta segunda jornada se realizaron las medidas en los mismos puntos que en la sesión anterior.

Las condiciones del entorno fueron totalmente diferentes a las del primer día debido a que se estaban realizando trabajos de preparación y de montaje de escenario para la representación de el espectáculo del *Misteri d'Elx*.

Debido que a priori según las especificaciones definidas por el fabricante, sobre la invulnerabilidad del sistema de medición con respecto a el ruido exterior, se realizaron las medidas para comprobar si el funcionamiento era el adecuado.

Los resultados fueron totalmente inservibles ya que las medidas fueron muy dispares y totalmente influenciadas por el ruido de fondo que provocaban los trabajadores.

Por este motivo se reafirmo lo anteriormente dicho la necesidad del protocolo de medición utilizado para las medidas y la necesidad de un estado del entorno sin ruido.

V.3. *RESULTADOS MEDIDAS DÍA 3 JUEVES 18 / 07 / 2013*

Total de medidas: 54 medidas

La tercera jornada las medidas se realizaron de toda la parte superior de la basílica, los palcos, en esta sesión se midió:

- Piedra palcos

La piedra utilizada en los palcos, el material utilizado es el mismo que en la planta inferior.

- Vidriera

En la planta alta hay unas vidrieras decorativas, que sirven además para iluminar la basílica. Y que corresponden a un gran porcentaje de la pared en la que se sitúa.

- Suelo planta alta

En la planta alta, a diferencia que en la baja, se trata de terrazo en lugar del mármol, además el desgaste es menor ya que el acceso es limitado.

– Piedra Palcos

Hz	Absorción	Desviación
125	0,09	6,08%
250	0,08	5,96%
500	0,04	2,59%
1000	0,04	2,35%
2000	0,04	2,30%
4000	0,03	0,02%
8000	0,06	1,34%

Tabla 9: Suelo Altar

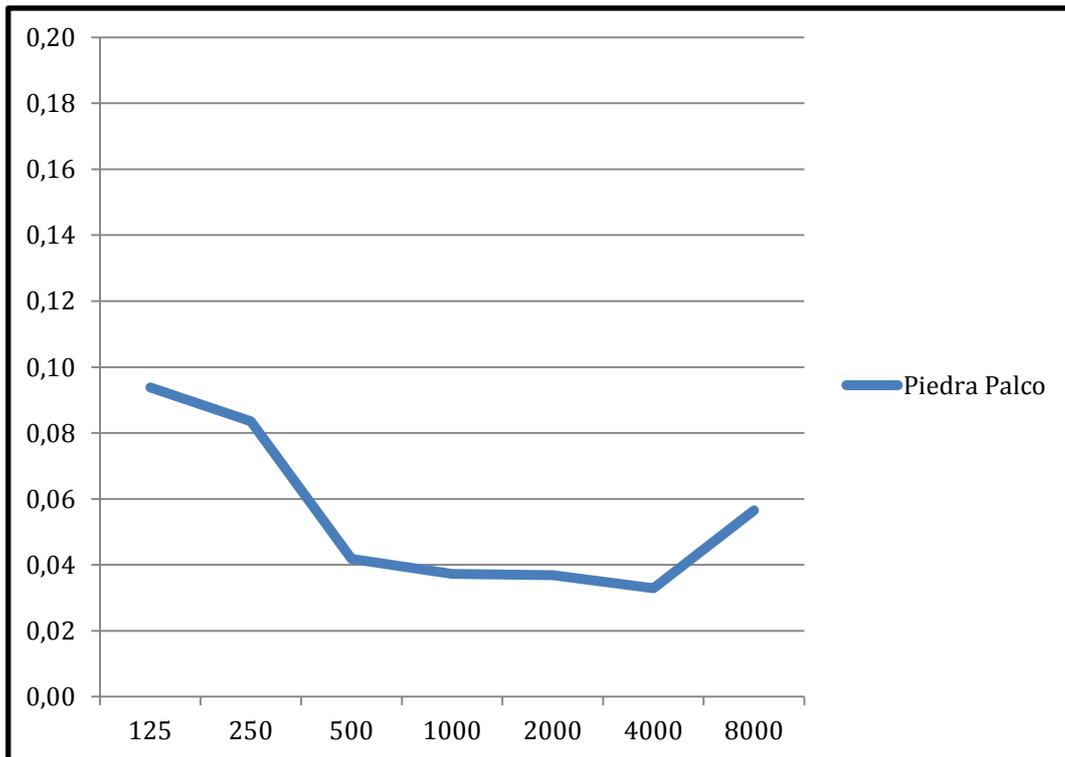


Fig. 15 Gráfico de absorción

- Vidriera

Hz	Absorción	Desviación
125	0,30	8,03%
250	0,19	6,23%
500	0,08	3,99%
1000	0,07	2,59%
2000	0,04	3,02%
4000	0,00	0,00%
8000	0,05	22,48%

Tabla 10: Vidriera

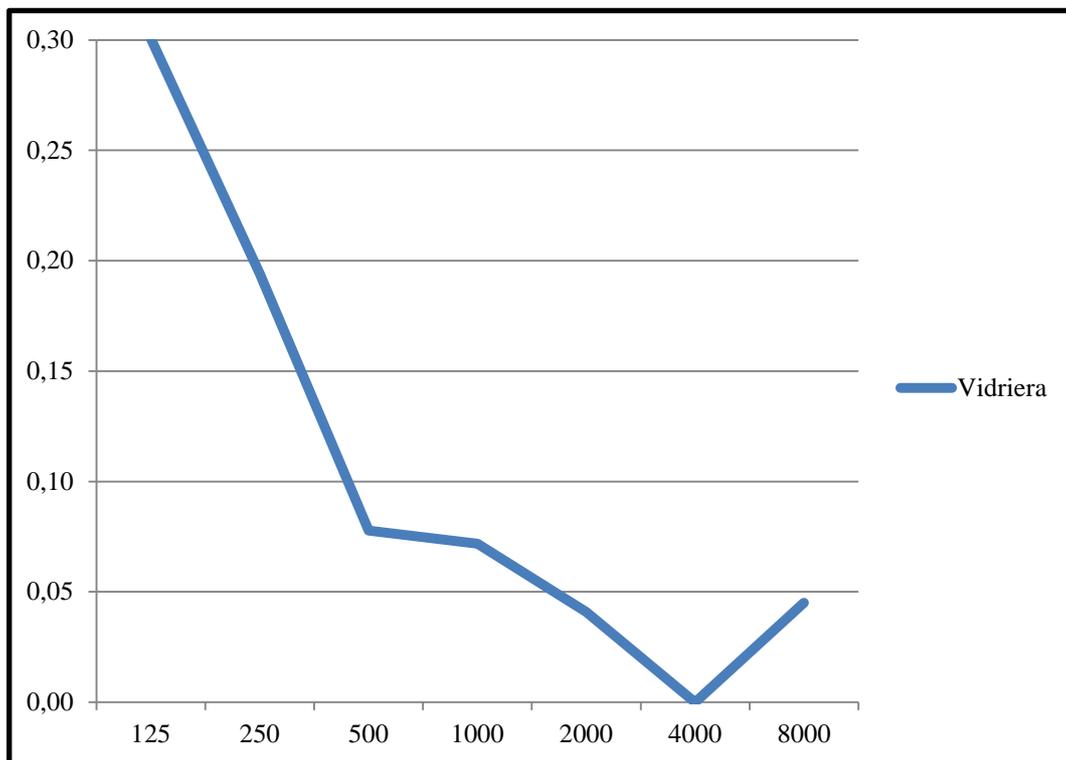


Fig. 16 Gráfico de absorción

En este caso las medidas han dado valores negativos en la frecuencia 4k. Estos negativos aparecen debido a la proximidad entre la fuente sonora y la muestra.

Debido a la disparidad de los valores medidos y la influencia baja con respecto a toda la superficie no se usará este material para la simulación.

– Suelo Planta alta

Hz	Absorción	Desviación
125	0,12	3,28%
250	0,11	5,34%
500	0,12	4,85%
1000	0,11	0,02%
2000	0,12	6,51%
4000	0,13	9,09%
8000	0,22	0,06%

Tabla 11: Suelo planta alta

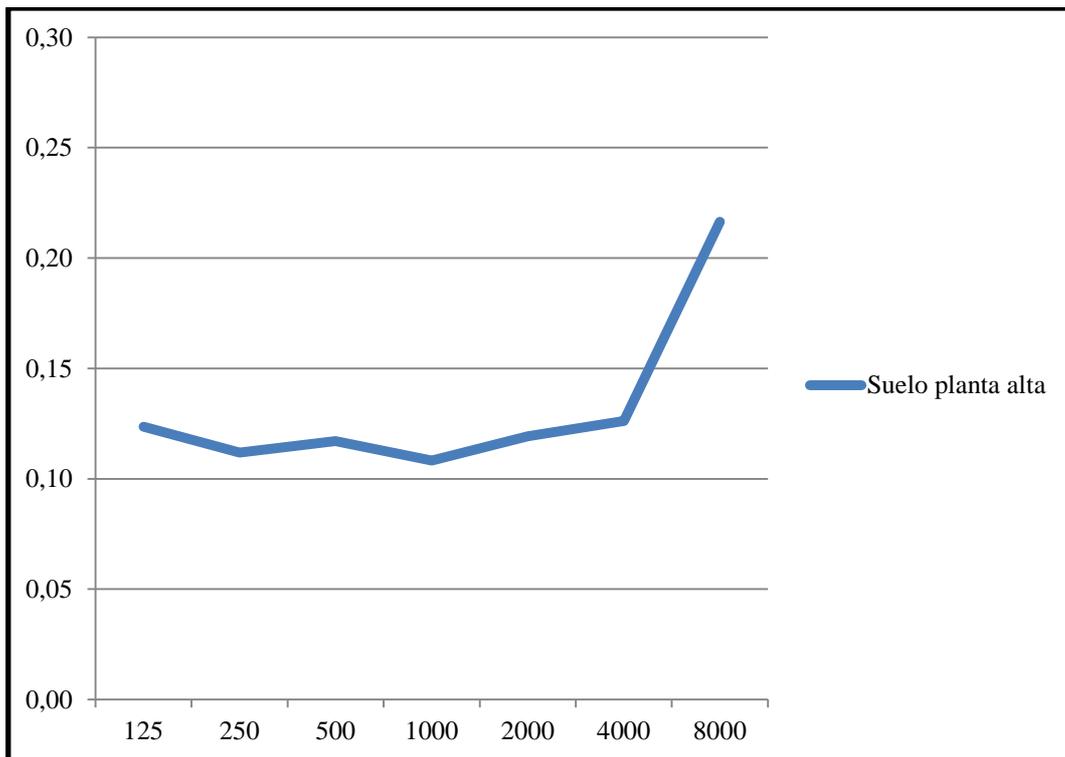


Fig. 17 Gráfico de absorción

V.4. CONCLUSIONES MEDICIONES ABSORCIÓN

Tras procesar todas las medidas de absorción, hay que tener en cuenta una serie de características previas antes de valorar las mediciones. Aunque la medida y la velocidad puedan ser medidas en todo el rango audible, el límite de cálculo del sistema de la impedancia acústica se encuentra entre 100 y 300 Hz, por lo que las medidas aunque se hayan representado desde 125-8000 Hz los valores se limitarían en bajas frecuencias a 250 Hz.[10]

Debido a que se mide la impedancia acústica del campo cercano, se encuentra separa la sonda del transductor 0,26m, el ruido de fondo y las reflexiones no deberían afectar a las medidas. En el momento de la grabación si que existía un ruido de fondo que fue incapaz de evitar, ya que aún estando la basílica cerrada el ruido exterior era apreciable en el interior, en frecuencias bajas.

Por otra parte, según publicó en *Tecniacustica* 2011[11] a la hora de estudiar materiales rígidos y con coeficientes de absorción muy bajos, que tienen una velocidad casi nula, aumenta de forma considerable los errores de las medidas.

En el congreso de *Tecniacustica* de 2013[14] se publicará un artículo en el cual trataba la “metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad”, en ella se llegaba a una serie de conclusiones.

- Se ha comprobado que, a frecuencias medias, los coeficientes mediante la sonda P-U se encuentran entre los de los ensayos normalizados, y siguen la misma tendencia.
- El “efecto borde” nos lleva a la conclusión de que en las mediciones es importante evitar bordes o esquinas.
- En materiales absorbentes a altas frecuencias aparecen unos valores negativos en la absorción, por lo que la medida no es válida en esas frecuencias.
- Uno de los aspectos más importantes y que debido a la novedad del sistema de medición, no existe una normativa de aplicación específica para este tipo de medición, por lo que el grupo de investigación en acústica virtual (UPV-UVEG) ha dedicado mucho tiempo a realizar comprobaciones así como ha definido un protocolo de utilización para realizar las mediciones con este aparato, sirviéndose de un contacto constante con los desarrolladores del instrumental de simulación consiguiendo un feedback entre ambos.

La absorción de los materiales medidos servirán para utilizar sus valores para realizar la simulación. Para validar dicha simulación los valores que se comprobaran son las frecuencias medias, ya que los programas de simulación a bajas frecuencias no son tan fiables, y es en las frecuencias medias donde los cantantes tienen el rango frecuencial de sus voces.

Utilizaré estos valores para la simulación a falta de configurar el scattering de los materiales. Y comprobare sin hacer ningún tipo de modificación que diferencias aparecen para la validación del modelo 3d.

VI. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN

Para la simulación acústica de la basílica de Elche, hemos utilizado el software de Brüel&Kjær Odeon.

El odeon es un programa de simulación que utiliza un método de reflexión híbrido. Una combinación entre el método de la fuente imagen, raytracing y ray-radiosity. Las reflexiones tempranas son calculadas por medio de el método de fuente imagen y la de ray-radiosity, y las reflexiones tardías son calculadas por un método especial que es una combinación del raytracing y el ray-radiosity.

La ventaja de estos programas con métodos híbridos lo que consiguen es obtener lo mejor de los diferentes métodos.

Existen dos métodos de medida del scattering basadas en el coeficiente de scattering *Lambert* y *full scatter*. [15]

Cuando se activa el método *Lambert* las direcciones de las reflexiones tardías, se calculan usando el parámetro de scattering fijado en la tabla de materiales, es decir, si el valor de scattering es 10% quiere decir que el 90% será especular y el 10% se calculará el scattering. Si se activa *full scatter* quiere decir que se calcula el scattering al 100%.

El método *Lambert* es calculado por medio de un vector generado a través de dos vectores.

Un coeficiente $s=0$ se trata de una superficie que refleja de forma especular y $s=1$ en la que la reflexión es aleatoria. Entre medias, se obtiene el resultado del vector especular ponderado a "1-s" y el vector aleatorio ponderado "s". [16]

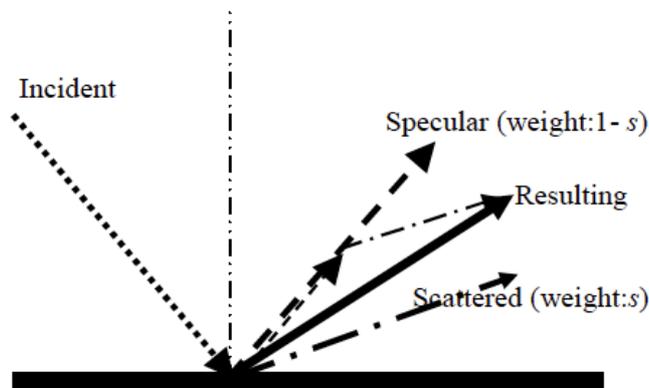


Fig. 18 Cálculo scattering *Lambert* Odeon

Para el valor de scattering que utilizare para la simulación me basare en una tabla de valores como referencia, con valores en frecuencias medias, estos son los valores que hay que darle a Odeon para el cálculo del scattering. [17]

MATERIAL	Scattering coefficient at mid-frequency
Audience Area	0,6 – 0,7
Rough building structures, 0,3 – 0,5 m deep	0,4 – 0,05
Bookshelf, with some books	0,3
Brickwork with open joints	0,1 – 0,02
Brickwork, filled joints but not plastered	0,05 – 0,01
Smooth surfaces, general	0,02 – 0,05
Smooth painted concrete	0,005 – 0,002

Tabla 12: Coeficientes sugeridos para frecuencias medias

A diferencia de otros programas de simulación no se le introducen los valores del scattering para toda las frecuencias, se introduce el valor del scattering a frecuencias medias y el programa expande el coeficiente para el resto de valores de cada una de las octavas por medio de interpolación y extrapolación. En este caso el coeficiente que se ha de poner es el correspondiente a la frecuencia 707Hz.

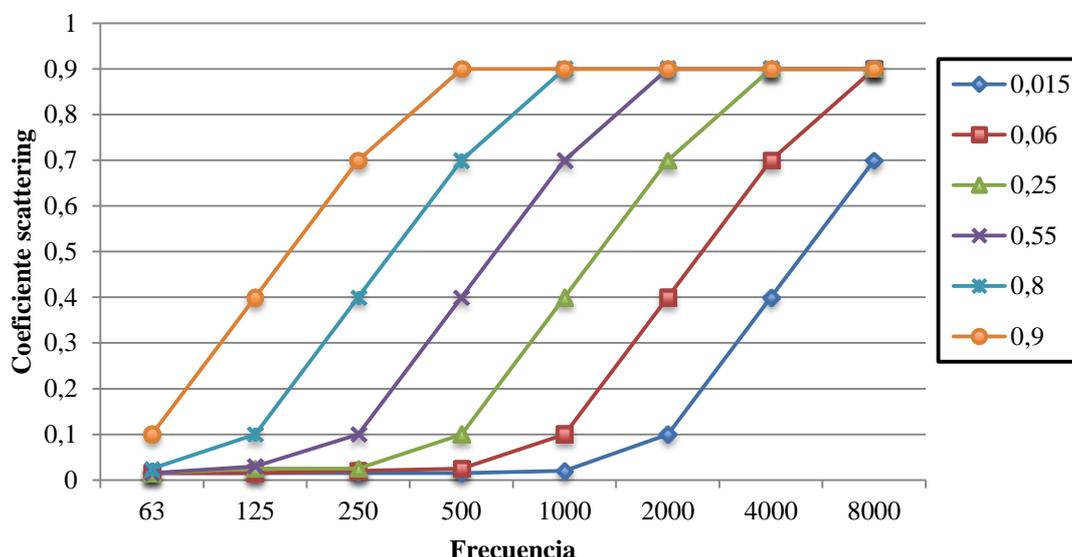


Fig. 19 Gráfica de interpolación para diferentes valores de scattering a 707Hz

Al activar *Lambert* se puede activar la opción *Oblique Lambert* la cual genera una zona de sombra donde no hay reflexiones, la sombra es pequeña si el valor de scattering es grande, o el rayo incide de forma perpendicular. Cuando se activa esta opción una cantidad del globo de reflexiones de *Lambert* radiaría energía fuera de la sala, por lo que se usa unos valores de atenuación en función del ángulo de incidencia.

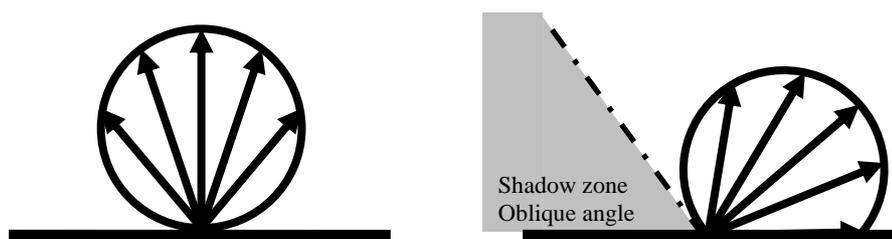


Fig. 20 Izq. Lambert Tradicional Dcha. Oblique Lambert

Además de usar los valores de absorción medidos también usare alguna base de datos de materiales ensayados en cámara reverberante y de usos común. [18]

A su vez una parte importante de la simulación es la de dar las características a los bancos de la basílica vacíos, ya que la medición de los parámetros se realizo con la basílica vacía, con las medidas que se validará, y posteriormente para hacer la auralización será necesario calcular con los bancos llenos de audiencia. [19][11]

Para la validación de la simulación el parámetro que se va a comparar es el T30, parámetro que define el tiempo que tarda la señal en caer 30dB, que es uno de los parámetros de referencia en lo que corresponde a la acústica de salas.

Debido a las deficiencias del software de simulación a bajas frecuencias y a que el rango de voz de los cantantes esta más centrado en frecuencias medias [20] la comprobación se realizara en las frecuencias 500 – 1000 Hz.

Para validar el modelo el valor de las frecuencias 500 – 1000 no han de variar con respecto al medido en más de 5%. Este porcentaje es el conocido como *Just Noticeable Difference (JND)*. [21] Esto quiere decir que con ese porcentaje de diferencia no es posible la diferenciación entre una medida y la otra.

Se ha seguido las indicaciones de la norma ISO 3382-1. [22]

Se ha puesto para la simulación el emisor y los 32 receptores en las mismas posiciones que se utilizaron para la medición realizada con anterioridad en la basílica.

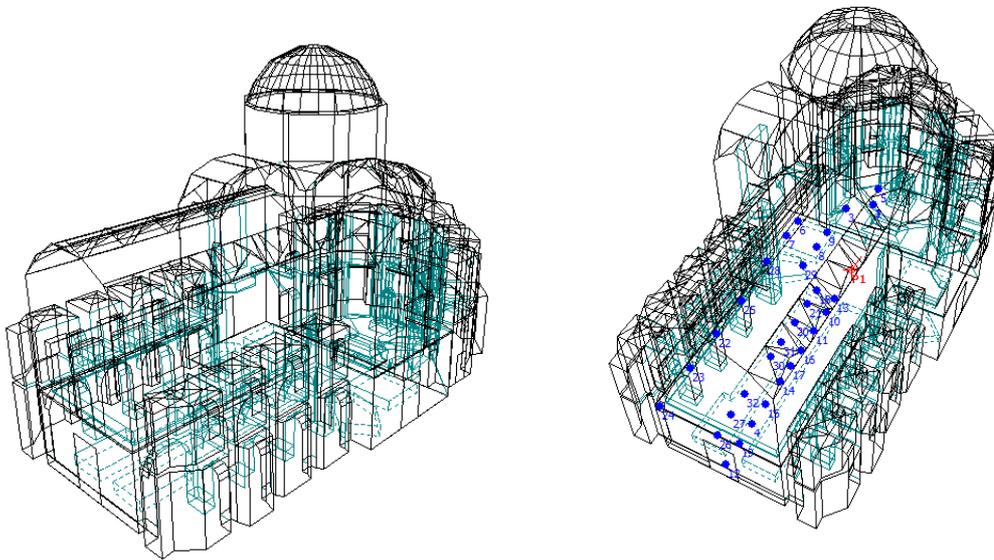


Fig. 21 Vista Exterior y con receptores Odeon



Fig. 22 Vista interior Odeon

VI.1. PRIMERA SIMULACIÓN

Para esta primera simulación lo que se ha realizado a sido, utilizando los valores de las mediciones en la basílica, en este caso no se ha tenido en cuenta el valor del scattering, por lo que se ha desactivado. Así como se ha quitado la capa de bancos.

PRIMERA SIMULACIÓN						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido(s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	6,12	6,04	7,85	6,92	5,90	3,26
Diferencia	1,39	1,14	-1,11	-0,93	-1,04	0,31
%	18,46%	15,92%	-16,54%	-15,48%	-21,34%	8,77%
	Promedio 500 - 1000		-1,02	-16,04%		

Tabla 13: Comparativa de mediciones

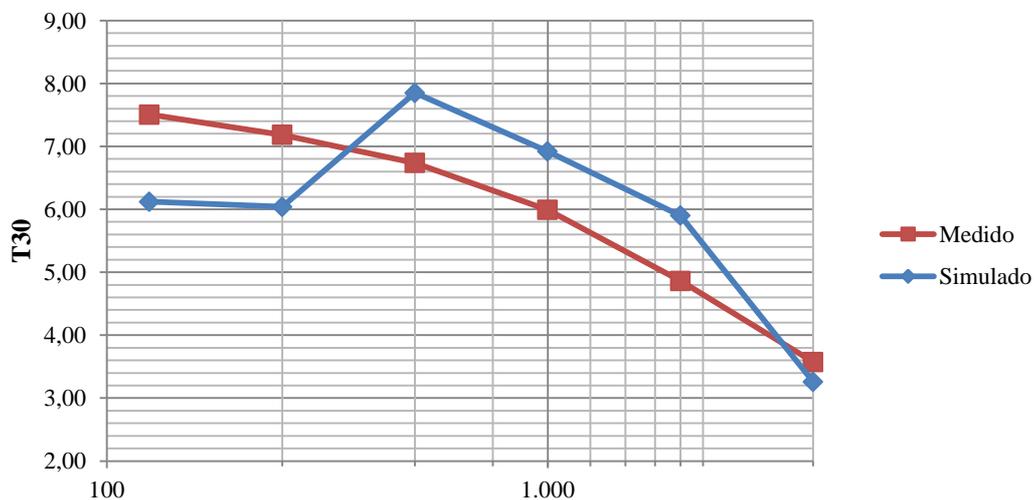


Fig. 23 Grafica comparativa

Como se puede observar en esta simulación los valores están todos por encima del 5% de diferencia, por lo que esta simulación no es valida con respecto a las medidas.

VI.2. SEGUNDA SIMULACIÓN

Para esta segunda simulación lo que se ha realizado a sido, utilizando los valores de las mediciones en la basílica, en este caso no se ha tenido en cuenta el valor del scattering, por lo que se ha desactivado. Pero si que se han tenido en cuenta la absorción de los bancos.

SEGUNDA SIMULACIÓN						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido(s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	5,56	5,47	6,76	5,93	5,33	3,06
Diferencia	1,95	1,71	-0,02	0,06	-0,47	0,51
%	25,92%	23,86%	-0,36%	1,04%	-9,62%	14,37%
Promedio 500 - 1000			0,02	0,30%		

Tabla 14: Comparativa de mediciones

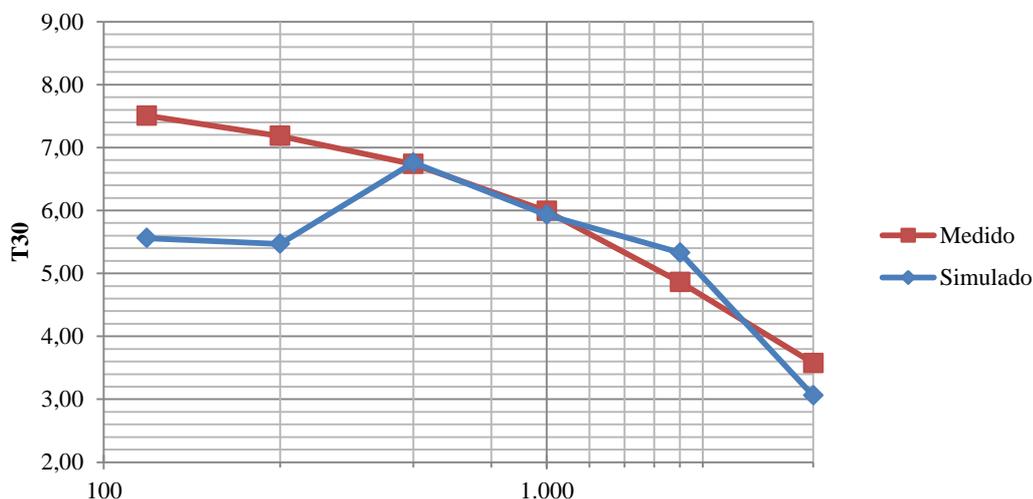


Fig. 24 Grafica comparativa

Con esta configuración el modelo en frecuencias medias da valores prácticamente idénticos, la variación en frecuencias medias es de -0,30%, por lo que esta configuración sería un modelo válido con respecto a la medición realizada en la basílica.

Por lo que esta configuración sería una configuración válida.

VI.3. TERCERA SIMULACIÓN

En la tercera simulación se ha configurado con, la opción de scattering de ODEON con el método *oblique Lambert* y con la frecuencia central de interpolación 707Hz. La capa de los bancos ha sido desactivada.

TERCERA SIMULACIÓN						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	5,99	5,96	7,54	6,57	5,84	3,19
Diferencia	1,52	1,22	-0,80	-0,58	-0,98	0,38
%	20,19%	17,03%	-11,94%	-9,64%	-20,11%	10,73%
Promedio 500 - 1000			-0,69	-10,86%		

Tabla 15: Comparativa de mediciones

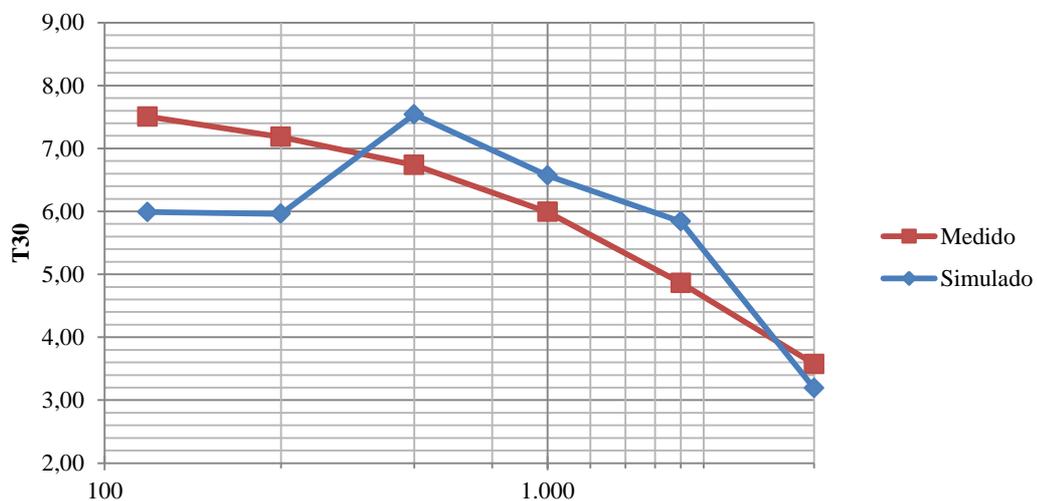


Fig. 25 Grafica comparativa

Como se puede observar en esta simulación los valores están todos por encima del 5% de diferencia, por lo que esta simulación no es valida con respecto a las medidas.

VI.4. CUARTA SIMULACIÓN

En la tercera simulación se ha configurado con, la opción de scattering de ODEON con el método *oblique Lambert* y con la frecuencia central de interpolación 707Hz. La capa de los bancos esta activada con un scattering de 0,20.

CUARTA SIMULACIÓN						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	5,91	5,74	7,00	6,24	5,44	3,15
Diferencia	1,60	1,44	-0,26	-0,25	-0,58	0,42
%	21,26%	20,10%	-3,92%	-4,13%	-11,88%	11,85%
Promedio 500 - 1000			-0,26	-4,02%		

Tabla 16: Comparativa de mediciones

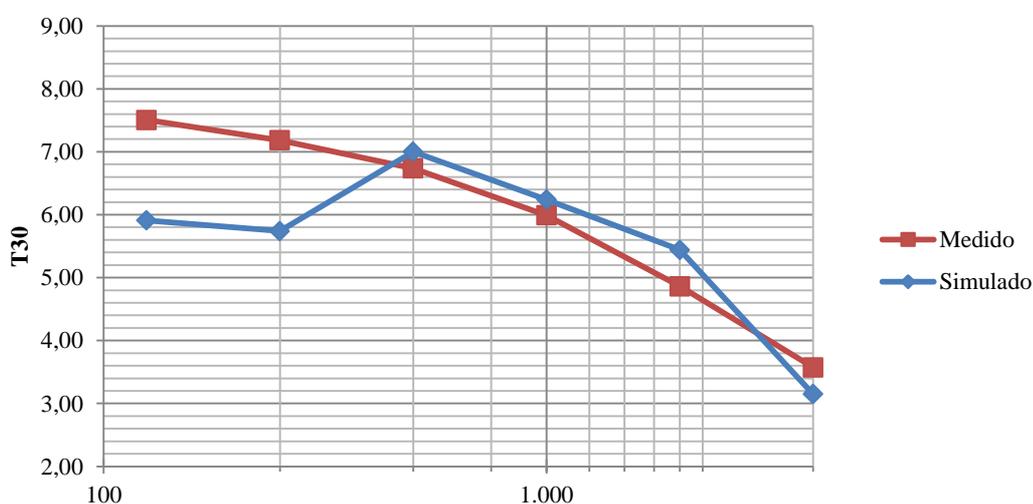


Fig. 26 Grafica comparativa

Esta simulación esta dentro de los mínimos establecidos para la validación de la simulación. Como se puede observar, los valores en las frecuencias medias son menores del 5% aunque se encuentran cercanos a ese 5% por lo que la primera simulación realizada es más fiable con respecto a esos valores. La única diferencia es la activación del cálculo del scattering, y esto genera mayor tiempo de reverberación a frecuencias medias.

VI.5. QUINTA SIMULACIÓN

En la tercera simulación se ha configurado con, la opción de scattering de ODEON con el método *Full scattering*. La capa de los bancos esta activada con un scattering de 0,20.

QUINTA SIMULACIÓN						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	5,73	5,57	6,73	6,02	5,29	3,21
Diferencia	1,78	1,61	0,01	-0,03	-0,43	0,36
%	23,66%	22,46%	0,15%	-0,46%	-8,80%	10,17%
Promedio 500 - 1000			-0,01	-0,14%		

Tabla 17: Comparativa de mediciones

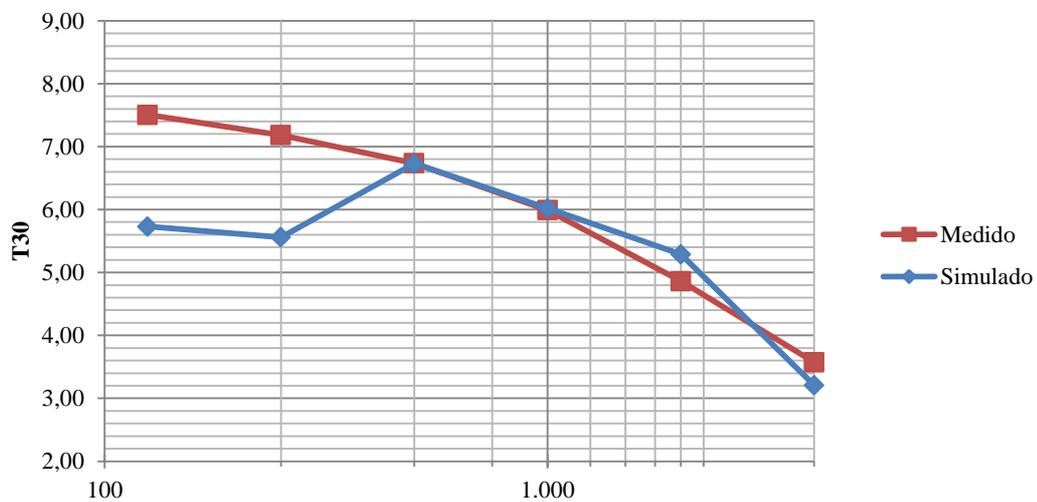


Fig. 27 Grafica comparativa

Esta simulación se realizó con los materiales medidos en el primer día sin más configuración que el full scatter.

En esta simulación a frecuencias medias la semejanza entre los valores medidos y los valores simulados es casi exacta. Los valores de absorción usados para la simulación son:

Descripción	125	250	500	1000	2000	4000
Banco	0,10	0,12	0,17	0,17	0,17	0,11
100% absorbente	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Piedra Medida	0,07	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04
Piedra Medida inferior	0,09	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
Suelo medido	0,14	0,11	0,12	0,15	0,08	0,08
Mármol altar	0,03	0,06	0,02	0,03	0,02	0,06
Madera puerta	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Suelo medido planta 1	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
Suelo altar	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01

Tabla 18: Valores de absorción medidos

Descripción	125	250	500	1000	2000	4000
Banco	0,10	0,12	0,17	0,17	0,17	0,11
100% absorbente	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Piedra Medida	0,07	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04
Piedra Medida inferior	0,09	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
Suelo medido	0,14	0,11	0,12	0,15	0,08	0,08
Mármol altar	0,03	0,06	0,02	0,03	0,02	0,06
Madera puerta	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Suelo medido planta 1	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
Suelo altar	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01

Tabla 19: Valores de absorción medidos

Se ha usado 100% absorbente en la puerta de la sacristía, ya que por ese acceso se accede a un lugar con un gran volumen que trabajaría como un lugar abierto, en el cual absorbe la totalidad de los rayos sin reflectarlo.

Para el material piedra medida se ha utilizado el material medido en la primera sesión modificando únicamente el valor de 4000Hz ya que es demasiado elevado, por lo que se utilizará el valor de 2000Hz.

VI.6. SIMULACIÓN VALORES EXPERIMENTALES

Para esta simulación en lugar de usar los valores medidos de absorción, se han utilizado los valores medidos en cámara reverberante que son comúnmente utilizados [18].

Se han usado estos valores de absorción:

Descripción	125	250	500	1000	2000	4000
Banco	0,10	0,12	0,17	0,17	0,17	0,11
100% absorbente	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Piedra Medida	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Piedra Medida inferior	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Suelo medido	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Mármol altar	0,02	0,06	0,02	0,03	0,02	0,06
Madera puerta	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Suelo medido planta 1	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
Suelo altar	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

Tabla 20: Valores absorción experimentales

Dando los siguientes resultados

SIMULACIÓN VALORES EXPERIMENTALES						
(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Medido (s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Simulado (s)	12,97	12,08	8,81	7,96	5,68	3,22
Diferencia	-5,46	-4,90	-2,07	-1,97	-0,82	0,35
%	-72,80%	-68,16%	-30,71%	-32,84%	-16,82%	9,89%
Promedio 500 - 1000			-2,02	-31,71%		

Tabla 21: Comparativa de mediciones

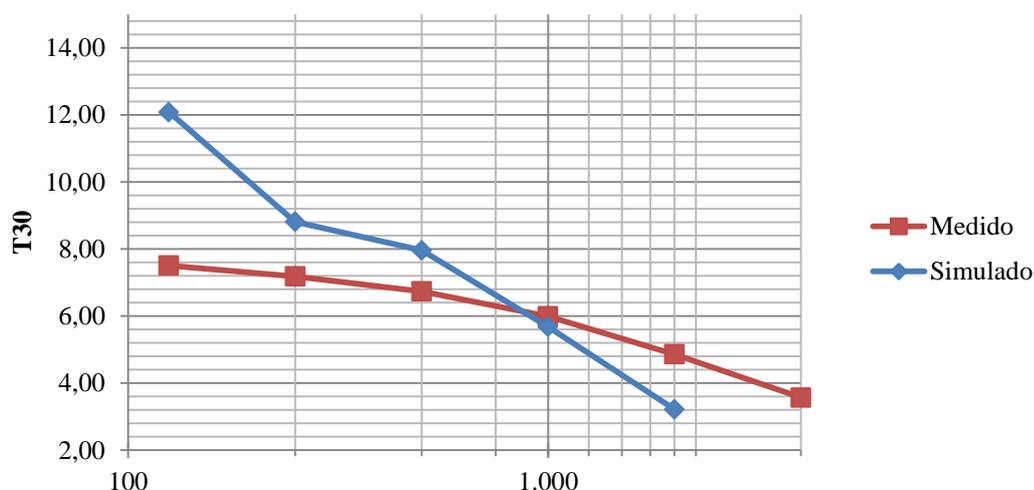


Fig. 28 Grafica comparativa

Como se puede observar la simulación da unos valores muy diferentes con respecto a lo medido, con valores de desviación del 30% con respecto a la medida. Por lo que estos valores no serán validos para nuestra simulación, debido a la singularidad de los materiales utilizados en la construcción de la basílica, la colocación y el paso de los años, que ha ido desgastándolos, los hace singulares por lo que no pueden utilizarse valores comerciales o experimentales.

VI.7. CONCLUSIONES SIMULACIÓN

Tras realizar todas las simulaciones de la basílica, la simulación que más precisión me ha dado a sido en la que utilizando los valores de absorción medidos en la basílica, el parámetro de scattering debido a que resulta muy difícil ser capaz de seleccionar los valores de materiales ya colocados sin posibilidad de medirlo. Y debido a la singularidad de los materiales dificultan esa tarea. Por lo que al seleccionar *Full scatter* con el parámetro definido con materiales que afecta al scattering de las reflexiones tardías.

A su vez utilizando los mismos valores de simulación pero con los parámetros de absorción medidos de forma normativa en cámara reverberante. Y con estos valores lo que queda demostrado es la necesidad de una medición de los materiales absorbentes, ya que la desviación con respecto a la medida es muy elevada. Por lo que no hace más que reafirmar que para casos en los cuales los materiales son tan singulares se necesita una medición de los materiales in situ, en este caso se trata de un edificio patrimonial histórico, por lo que los materiales no se pueden comparar con materiales de la actualidad ya que el desgaste y el paso del tiempo ha modificado sus parámetros,

VII. SIMULACIÓN DE LA TERCERA BASÍLICA

Uno de los puntos con un mayor interés de este trabajo es la simulación de la basílica anterior a la del estado actual. Con la hipótesis que se definió anteriormente se ha realizado la recreación volumétrica de esta iglesia.

Esta basílica se ha representado con respecto a el estado actual, la nave principal es de la misma longitud en ambas, a diferencia del estado actual no existen galerías en la planta alta, ya que era de planta baja únicamente. El altar esta cubierto por una semi-cúpula.

La planta se trata de la característica en el periodo gótico-renacentista, que se caracterizaba por volúmenes a base de prismas. Además los contrafuertes de los arcos de la bóveda divide la planta en diferentes capillas, en este caso estaba formada por ocho capillas.

Esta tipología no tiene transepto por lo que se trata de una planta rectangular.

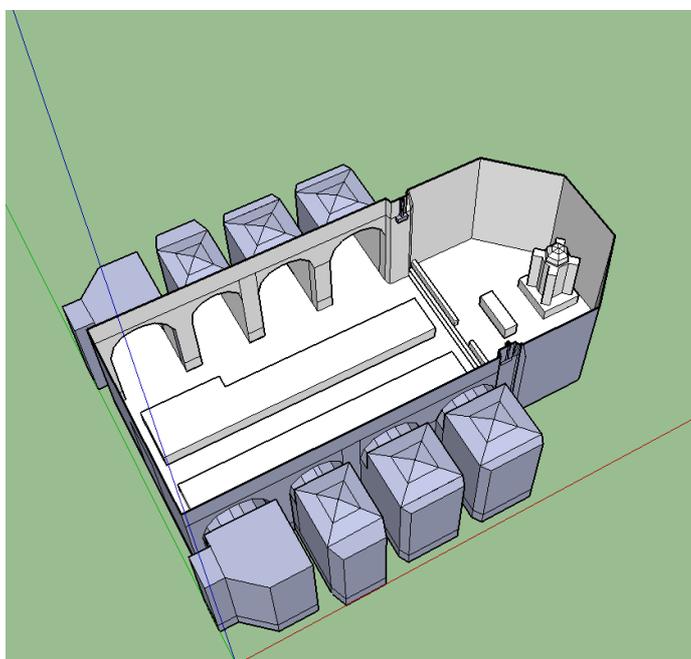


Fig. 29 Vista sección planta tercera basílica

Para la simulación se utilizará los mismos valores que en la simulación que resulto más precisa con respecto a la medición de realizada en la basílica.

Así como los parámetros de absorción, son los medidos y utilizados para la simulación anterior.

En este caso no es posible conocer las características de dichos materiales ya que la basílica desapareció debido a un derrumbamiento. El uso de los materiales utilizados en las simulaciones del estado actual, se ha adoptado ya que los materiales de construcción utilizados en ambas iglesias seguramente tendrían características similares ya que el acceso a materiales de construcción (piedra, mármol entre otros) resultaba difícil, por lo que probablemente utilizarían las mismas canteras para conseguir estos materiales, así como el reciclado de muchos materiales de la basílica derrumbada, para construir la actual.

Los valores resultantes de la simulación son:

SIMULACIÓN TERCERA BASÍLICA						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Tercera (s)	8,24	8,36	7,25	5,63	4,82	2,81
Actual (s)	7,51	7,18	6,74	5,99	4,86	3,57
Diferencia	-0,73	-1,18	-0,51	0,36	0,04	0,76

Tabla 22: Valores simulados

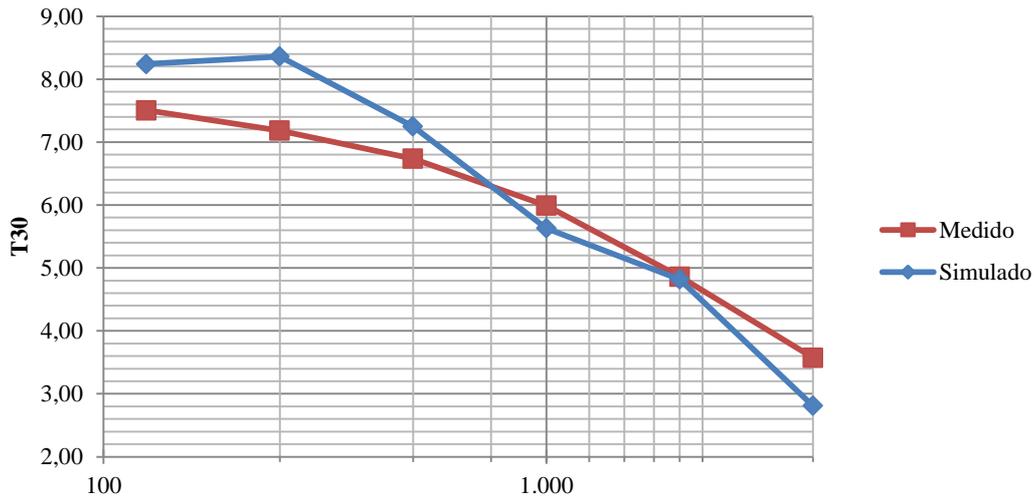


Fig. 30 Gráfica comparativa

La diferencia clara de volumen, entre ambas basílicas, hace que el tiempo de reverberación sea más elevado con respecto a los valores de la simulación del estado actual.

Esta simulación se realizó como la configuración que se utilizó para la simulación más cercana a la medida. Cabe decir que esta simulación está realizada considerando la basílica vacía, así como sin el montaje de todo el escenario en el cual se desarrolla toda el espectáculo de *El misteri d'Elx*.

La afluencia año tras año a la basílica es masiva, por lo que la absorción correspondiente al público es un parámetro realmente importante que será motivo de estudio en el momento que se pretenda utilizar el modelo para por medio de grabaciones de cantantes auralizar y poder recrear la acústica de la basílica.

El Odeon tiene la posibilidad de conocer la respuesta impulsiva binaural de la sala (BRIR), con ella se puede conseguir por medio de la convolución con una señal grabada en una sala anecoica, la sensación de estar escuchando como sería estar en esta Basílica que desapareció hace tantos años. Además el programa ya viene implementado con una aplicación que permite la auralización introduciéndole la señal anecoica grabada.

El propio programa incluye una serie de filtros para producir señales binaurales, a su vez también existe la posibilidad de hacer dicha recreación en tiempo real.

También permite la compensación de la respuesta no lineal en frecuencias de los auriculares utilizados para la escucha.

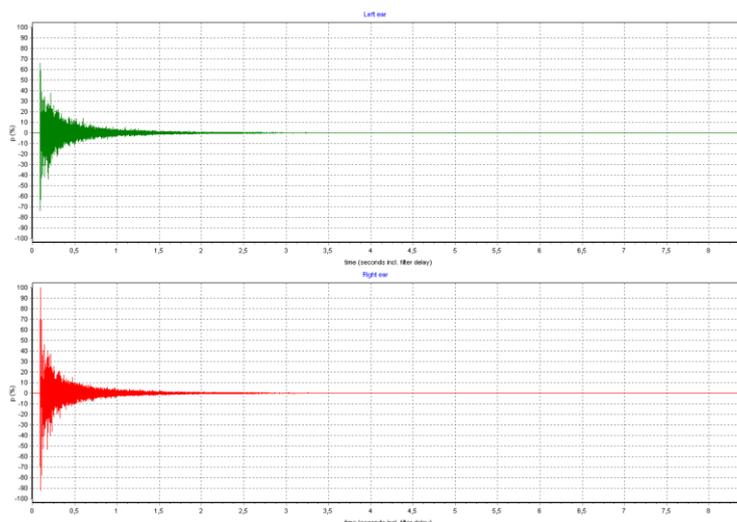


Fig. 31 BRIR

VIII. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VIII.1. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo, se ha seguido un proceso para intentar conseguir una recreación fidedigna del entorno acústico que envuelve a una celebración de tanta importancia y repercusión como es *El misteri d'Elx*. A lo largo de este proceso se han realizado trabajos de índole totalmente diferente, como por ejemplo la consulta de archivos históricos en la biblioteca de la Basílica, la representación en tres dimensiones de la misma y el trabajo de campo, con la medición de los materiales y la grabación de los cantantes.

Con respecto a la recreación en 3d, he utilizado por primera vez el programa de dibujo Sketch Up, que se trata de un interfaz muy intuitivo a la vez que preciso. Además, existe un plugin para la conversión directa al programa de simulación Odeon.

Se trata de un software que facilita el manejo para todos aquellos no familiarizados con el dibujo con programas CAD (computer-aided design). A su vez permite el uso de volúmenes sólidos para dibujar y se consigue una visualización mucho más fácil para el usuario.

Tras realizar la medición in situ de la absorción de los materiales, comprobé la vulnerabilidad del método de medición. Ya que las condiciones del entorno influyen en la medida. A su vez, no existe ninguna normativa para realizar dichos ensayos, por lo que resulta necesario si se pretende estandarizar y normalizar este tipo de medida de absorción, así como un protocolo de medida para lograr los resultados óptimos que puede generar este método novedoso.

Con respecto a la simulación, los valores obtenidos en la última simulación, nos dan resultados prácticamente exactos, a frecuencias medias (500-1000Hz). Estas frecuencias son en las cuales el método de simulación tiene su rango de validez, ya que a bajas frecuencias debido a no considerar el carácter ondulatorio hace que los resultados no sean completamente satisfactorios.

Después de las simulaciones realizadas, cabe pensar que cuando se intenta simular lugares singulares o patrimoniales, en los cuales, uno de los aspectos más importantes a considerar en estos edificios son las características de los materiales, es necesario tener en cuenta la naturaleza

de los mismos, ya que se trata de materiales que, debido al paso del tiempo, pueden haber sufrido alteraciones con respecto a su estado original y, por lo tanto, no son válidos los valores ensayados con otros materiales genéricos.

Para darle a la simulación la mayor veracidad posible se hace necesario dar a cada superficie un valor de scattering. Actualmente existe un método de medida del scattering, pero no existen aun muchos datos experimentales fiables, a su vez, la singularidad de los materiales utilizados en este proyecto hacía imposible encontrar valores para estas superficies.

Debido a falta de tiempo no fue posible la realización de la auralización, las grabaciones fueron realizadas en el lugar de ensayos de los cantantes, ya que debido a la proximidad del evento no pretendíamos turbar esa preparación.

VIII.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con este proyecto se ha realizado un trabajo que puede servir para futuras líneas de investigación y trabajos sobre la Basílica de Santa María.

Una vez calibrado el modelo, y con las mediciones de los cantantes, en cámara anecóica, poder proceder al auralizado de la representación, ya se comento con el patronato de *El misteri d'Elx* y estaban muy interesados, la posibilidad de grabar a todos los interpretes, y así poder recrear de forma virtual toda la representación de *El misteri d'Elx*.

A su vez, el grupo de acústica virtual, lo que pretende además de recrear la acústica, recrear el entorno tridimensional texturizando el modelo 3d, para que fusionándolo con la auralización y la representación tener acceso a una realidad virtual de la Basílica y *El misteri d'Elx*.

Dentro de la simulación, la fuente que generará la señal auralizada, requerirá un espectro característico para la música de estilo medieval como ese este, ya que la mayoría de los usados por el Odeon son para cantantes con un registro de música moderna.

Para finalizar, con respecto a la Basílica derruida que se intento recrear, se le podría aplicar todo lo citado anteriormente para poder llevar a cabo un proceso de recreación completo y poder lograr esa experiencia de realidad virtual.

IX. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer y, dedicarle unas líneas de este trabajo, al grupo humano que forma el grupo de acústica virtual de la Universidad Politécnica de Valencia, especialmente a Alicia Giménez, que fue la que me permitió formar parte de su grupo durante los meses en los que les ayudé y elaboré mi tesina. Gracias al trabajo que venían desarrollando en la Basílica de Elche he podido ampliar mis conocimientos sobre acústica y despertar aún más, si cabe, mi interés por este mundo. Ha sido, sin duda, una gran experiencia para mi persona y para mi formación. Así como a mi tutor de la tesina, Francisco Javier Redondo Pastor

Por otro lado, me gustaría agradecer al Patronato del Misteri d'Elx, que en todo momento se mostraron muy atentos conmigo, proporcionándome toda la información de la que disponían, y permitiéndome el acceso y la grabación de sus ensayos. Sin duda, se trata de un grupo muy profesional, con un gran respeto hacia el acto que representan.

Nombrar también a la persona responsable del archivo de la Basílica, Joan Castanyo i García, quien me abrió las puertas y dedicó parte de su tiempo a recopilar cuanta información y documentación disponía acerca de la misma. Gracias a él tuve acceso a documentación de gran valor histórico, también agradecer a José Luis Úbeda (arcipreste) y a Manolo (sacristán) los cuales permitieron el acceso a la Basílica fuera del horario de apertura al público.

Gracias también a José Antonio Román, Mestre de Capella, que nos permitió el acceso privilegiado a los ensayos del Misteri d'Elx, así como a todos los integrantes del espectáculo que asistían a dichos ensayos.

Por último, agradecer a todas las personas que me han apoyado y ayudado durante estos meses de intenso trabajo, como a mi familia, amigos y profesores de la Universidad Politécnica de Gandía.

X. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D'ELX, P. d. (s.f.). *Misteri D'ELX* . Obtenido de <http://www.misteridelx.com>
- [2] UNESCO. (2008). *UNESCO*. Obtenido de Mystery play of elche: <http://www.unesco.org/culture/ich/RL/00018>
- [3] Castanyo i García , J. (1994). *Guia de la arcipestral e insigne Basílica de Santa Maria de Elche*. Elche: CAM Fundación Cultural.
- [4] Varios. (1607-1676). *Libro Visitas Pastoral*. Elche.
- [5] Varios. (1592-1699). *Libro de Juntas Parroquiales*. Elche.
- [6] Martínez Blasco, T., & Martínez Blasco, M. (1990). *La arquitectura como escenario de "El misterio de Elche"*. Elche: CAM Fundación Cultural.
- [7] Christensen, C. L. (2009). *Odeon User Manual version 10.1* . Lyngby, Denmark.
- [8] Montell, R., Segura, J., Planells, A., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., y otros. (s.f.). SIMULACIÓN ACÚSTICA DE AUDITORIOS Y EDIFICIOS PATRIMONIALES. INTEGRACIÓN CON ENTORNOS DE REALIDAD VIRTUAL . *ISVA International seminar on Virtual Acoustics* .
- [9] Planells, A., Montell, R., Segura, J., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., y otros. (2011). ELABORACIÓN DE MODELOS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO EN ENTORNOS VIRTUALES. *International Seminar on Virtual Acoustics* . www.microflown.com. (s.f.).
- [10] Tijs, E., Fernández Comesaña, D., & García Escribano, D. (2011). CARACTERIZACIÓN DE ABSORBENTES ACÚSTICOS IN-SITU MEDIANTE SONDA PU. *TECNIACUSTICA* .
- [11] Martellotta, F., & Cirillo, E. (2009). Experimental studies of sound absorption by church pews. *Applied Acoustics* , 441-449.
- [12] Martellotta, F., Crociata, S. D., & D'Alba, M. (2011). On site validation of sound absorption by church pews. 923-933.
- [13] Pérez, C., Montell, R., Cibrián, R., Cerdá, S., Segura, J., Barba, A., y otros. (2013). Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad. *Tecniacustica* .
- [14] Christensen, C. L., & Rindel, J. H. (2005). A new scattering method that combines roughness and diffraction effects. *Forum acoustic* .
- [15] Odeon. (s.f.). *Odeon Room Acoustic Software*. Obtenido de www.odeon.dk
- [16] RINDEL, J. H. (2010). ROOM ACOUSTIC PREDICTION MODELLING. *XXIII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA* .
- [17] Vörländer, M. (2008). *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer.
- [18] LEO, K. (s.f.). ACOUSTICAL MEASUREMENTS OF SOUND ABSORBING PEWS.
- [19] MI Uzcanga Lacabe, S. F.-T. (2006). Voz Cantada. *Universidad de Navarra* , 49-55.
- [20] Hak, C. C., Wenmaekers, R. H., & Luxemburg), L. C. (2012). Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters. *Acta acustica united with acustica* , 98, 907-915.
- [22] AENOR. (2010). UNE-EN ISO 3382-1: 2010 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.