

## **Diseño acústico de una sala elipsoidal denominada "Instrumento Músico" presentada en el Mapapoètic del FORUM 2004 de Barcelona**

F. Daumal i Domenech<sup>a</sup>, A.Giménez Pérez<sup>b</sup>, L.Benac Vegas<sup>b</sup>, W.Valdez Cragnolini<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departament de Construccions Arquitectòniques I, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Av. Diagonal, 649, 08028 Barcelona, [Francesc.Daumal@upc.es](mailto:Francesc.Daumal@upc.es) <sup>b</sup> Grup d'Acústica Arquitectònica Ambiental i Industrial, Departamento de Física Aplicada, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Camino de Vera s/n, Edificio D5 Bajo, 46022 Valencia, [agimenez@fis.upv.es](mailto:agimenez@fis.upv.es)

**RESUMEN:** El trabajo presenta la realización del diseño y simulación acústica de una sala elipsoidal truncada por dos planos horizontales denominada "*Instrumento Músico*", (susurrador), basado en la tipología del "festejador" de la arquitectura Gótica catalana, presentada en el Mapapoètic del FORUM 2004 de Barcelona.

Su desarrollo se realizó mediante dos líneas paralelas de investigación que consistieron en establecer un modelo a escala real "in situ" y la modelización informática. La simulación se realizó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPV, mediante un software de bajo costo<sup>1</sup> que, mediante técnicas adecuadas y utilizando herramientas de fácil acceso puede ser aplicado para geometrías complejas como la sala estudiada. El modelo a escala real fue construido con resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio por un equipo de 12 personas en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos incluyendo asimismo las pruebas de auralización.

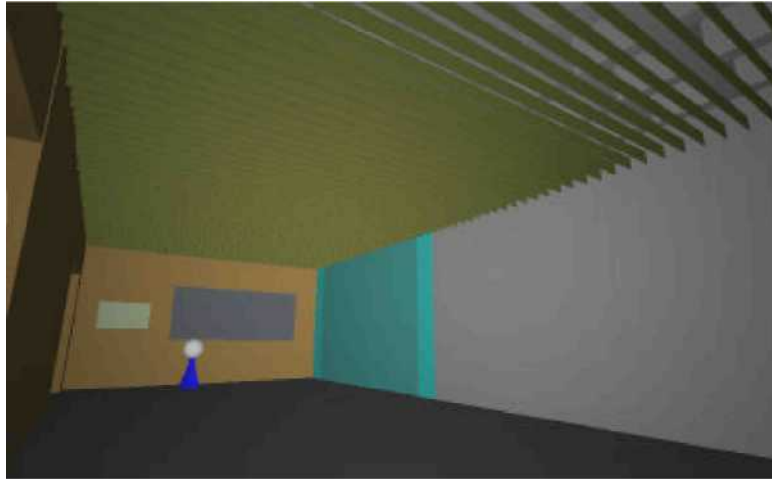
**SUMMARY:** The work presents the realization of the design and acoustic simulation of an ellipsoidal room truncated by two horizontal planes denominated "Musical Instrument", (the whisperer), based on the "festejador" typology of the Catalan Gothic architecture, presented in the "Mapapoètic" of the FORUM 2004 of Barcelona.

The study development was carried out by means of two parallel investigation lines that consisted on establishing a model to real scale "in situ" and the computer modelization. The simulation was carried out in the High Technical School of Industrial Engineers of the UPV, by means of a low-cost software, by means of appropriate techniques and using tools of easy access this software can be applied for simulating complex geometries as the studied room. The pattern to real scale was built with glass fiber reinforced polyester resin by a team of 12 people in the High Technical School of Architecture of Barcelona (ETSAB).

In this work the obtained results are presented, including the auralization tests also.

### **1. VERIFICACIÓN DEL MODELO**

Con objeto de validar el modelo se contrastaron los resultados obtenidos por el software utilizado con medidas "in situ". Para esta validación se modelizó el Salón de Grados de La Casa del Alumno de la Universidad Politécnica de Valencia. Las medidas reales se obtuvieron mediante el uso de software de medida y análisis de datos<sup>3</sup>. La Fig. 0 muestra una vista 3D del modelo de la sala.



*Fig. 0*

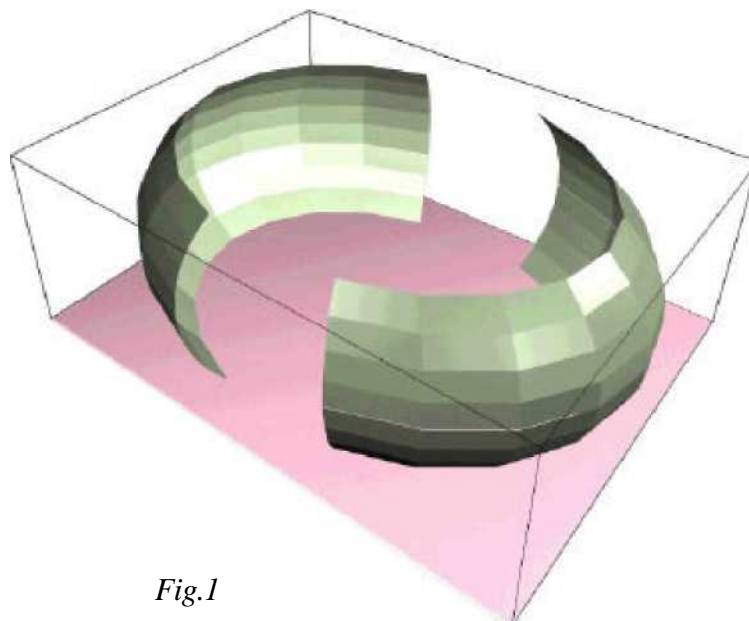
La simulación se llevó a cabo usando el número de reflexiones recomendado por el programa para la absorción media de la sala (15%) y se obtuvieron resultados similares a los obtenidos por medición.

## **2. MODELIZACIÓN DEL "INSTRUMENTO MÚSICO"**

### **2.1 La sala:**

El software de cálculo únicamente permite la introducción de la geometría de la sala mediante su propio módulo de dibujo. Este módulo opera sobre una vista en planta de la sala y no dispone de vistas frontales ni laterales. Para la introducción de la altura de la sala se utiliza un menú. Para definir tabiques interiores, paneles, mobiliario e inclinaciones de las paredes (cuñas) se dibujan estos en planta y luego se definen sus dimensiones y posición en altura mediante menús.

La sala objeto de estudio tiene forma de elipsoide truncado por dos planos horizontales y con dos aberturas laterales al exterior. La geometría elipsoidal se discretizó por planos mediante un software de dibujo 3D gratuito<sup>2</sup> y se generaron planos a escala del modelo de la sala. La Fig.1 es un esquema de la geometría de la sala.

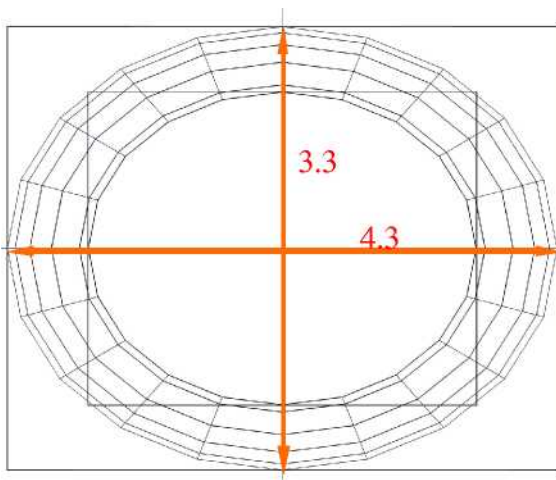


*Fig.1*

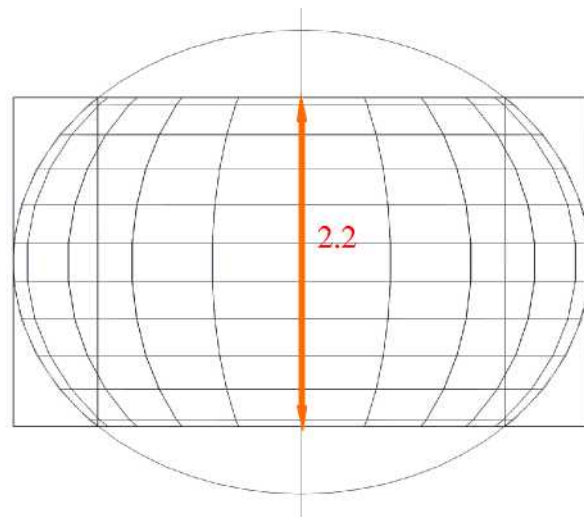
En primer lugar se midió la posición y altura de las caras del modelo sobre los planos a escala generados con el software de dibujo. Al tener la sala tres planos de simetría bastó con medir un octante de esta.

Para la simulación se partió de una sala base con la altura de la sala a estudiar y dimensiones en planta iguales a los semiejes del elipsoide. Se introdujeron en la sala objetos 3D de tipo cuña de manera que fuesen formando por su cara interna las caras del elipsoide de acuerdo con las mediciones efectuadas. Este proceso es algo laborioso aunque únicamente es necesario completar de esta manera la mitad de la geometría de la sala pues una vez hecho esto el programa permite agrupar las cuñas creadas y girarlas en planta para formar la otra mitad. A las paredes de la sala base se les asignó un material de absorción unidad (ventana abierta) para evitar reflexiones no correspondientes a la geometría de la sala.

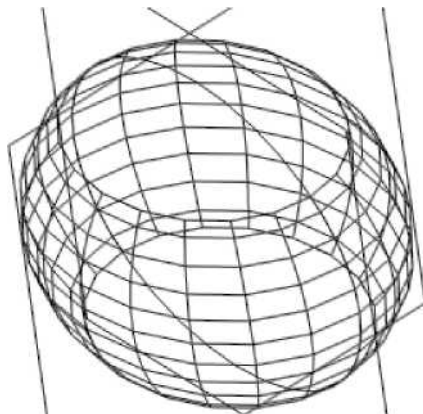
Las siguientes figuras (Fig. 2, 3 y 4) se corresponden con los planos generados por el programa de dibujo mediante proyecciones ortogonales del modelo.



*Vista cenital (Fig.2)*



*Vista frontal (Fig. 3)*



*Perspectiva ortogonal (Fig.4)*

En la figura Fig.5 se muestra la geometría de la sala en el módulo de dibujo del software acústico. Se han añadido las aberturas laterales correspondientes a las puertas, la posición del oyente, de un altavoz emisor y un tabique intermedio de absorción unidad. Esta disposición pretende evaluar en el oyente el sonido reflejado por las paredes de la sala, el tabique intermedio evita la llegada de sonido directo.

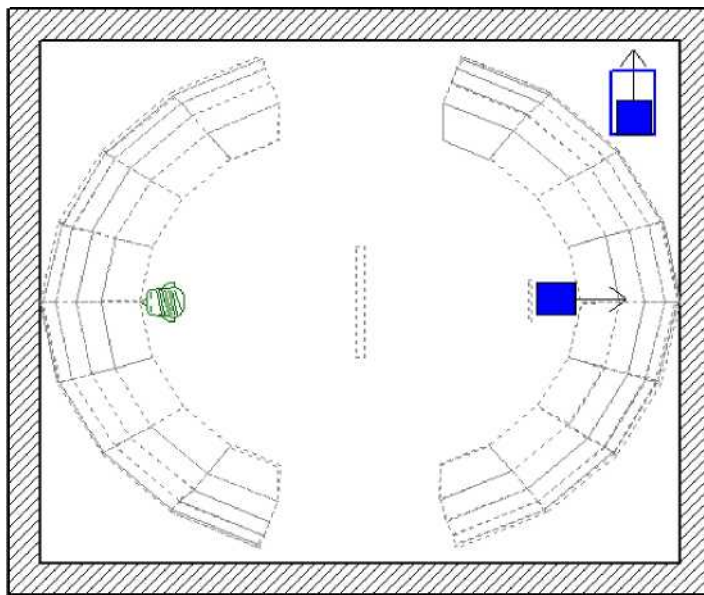


Fig. 5

El altavoz situado en la esquina superior derecha no fue incluido en los cálculos y únicamente aparece porque el programa obliga a tener un mínimo de dos altavoces en la sala.

La figura Fig.6 presenta detalles de la vista 3D de la sala (mediante la ventana de visualización 3D del software acústico de simulación).

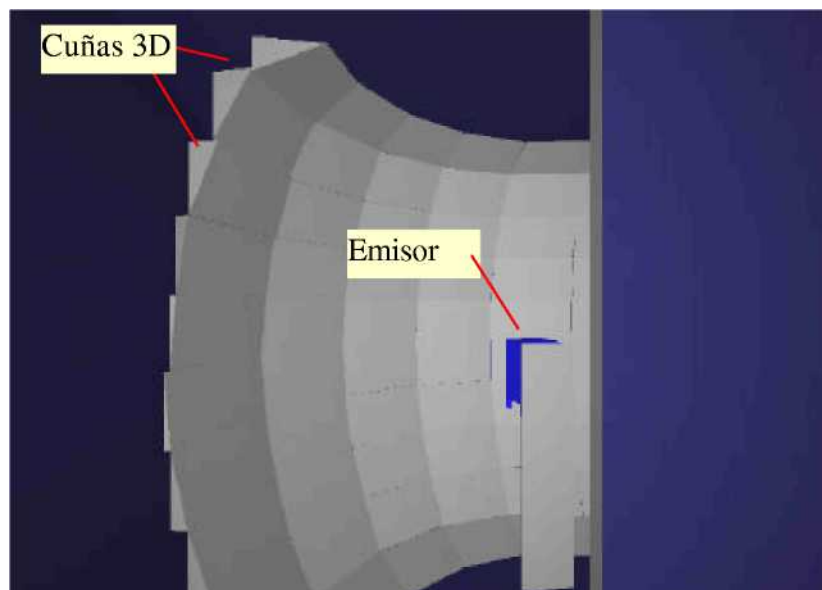
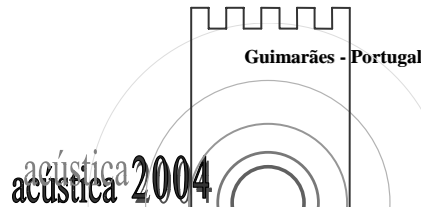


Fig. 6



## 2.1 Los materiales

El programa tiene una base de datos con materiales comunes y su absorción en función de la frecuencia. Se pueden agregar a la base de datos materiales definidos por el usuario y modificar los existentes. Los materiales pueden aplicarse a los objetos 3D y a las paredes, pudiendo definir en estas distintas zonas diferentes materiales para cada una (simular ventanas, cortinas etc). Se realizó el cálculo con distintos materiales para las paredes con el fin de optimizar el tipo de material constructivo de la sala.

## 2.2 La fuente

El programa permite el uso de toda una base de datos de altavoces comerciales y predefinidos del programa, pudiendo modificarse para adaptarlos a nuestras necesidades y obtener su direccionalidad y su espectro de emisión en función de la frecuencia. Alternativamente (y por los resultados obtenidos quizás con mayor precisión), puede obtenerse el diagrama nivel-frecuencia mediante el uso de una sala con paredes de absorción unidad definida por el usuario. Esta sala simularía las condiciones de trabajo en campo libre. Se sitúa en la sala al oyente y al altavoz del que se pretende obtener su emisión a la distancia deseada y se usa el módulo de cálculo del programa para obtener los diagramas deseados (el espectro de emisión del susurro).

La direccionalidad puede medirse colocando en distintas posiciones respecto al altavoz distintos oyentes y efectuando los cálculos para cada uno. Los oyentes pueden colocarse en un plano en disposición circular alrededor del altavoz e incluso en disposición esférica si previamente se calcula las coordenadas adecuadas.

Si la direccionalidad de nuestro altavoz emisor no es la deseada pueden usarse objetos 3D colocados a su alrededor para simular esta direccionalidad. En la Fig. 5 se muestra el altavoz emisor con un pequeño obstáculo posterior de absorción unidad. Esto se hizo para aproximar la direccionalidad del habla humana. El altavoz emitía un nivel bastante elevado por su parte posterior y con esta disposición se consiguió simular la menor emisión posterior del habla humana. Del mismo modo el obstáculo llega hasta el suelo de la sala para simular el cuerpo de una persona sentada.

## 2.4 Resultados

Una vez definida la geometría de la sala, el módulo de cálculo del paquete de software nos permite obtener los siguientes resultados:

- Nivel sonoro e inteligibilidad en un plano horizontal de la sala.
- Respuesta en frecuencia percibida por el oyentes u oyentes.
- Absorción de la sala.
- Reverberación de la sala a distintas frecuencias.
- Direccionalidad percibida por el oyente y en el plano horizontal.
- Propagación del primer frente de onda en un plano de la sala.
- Auralización.
- Optimización de la posición de los altavoces.

El módulo de cálculo trabaja por trazado de rayos, siendo el nivel de reflexión máximo el número de reflexiones que se tienen en cuenta en el cálculo. Para los cálculos de niveles y directividad percibida por el oyente es suficiente utilizar un nivel de reflexión máximo de 4 o 5. Se recomienda un nivel de reflexión del orden de 10, e incluso más alto si se trata de determinar la reverberación y la inteligibilidad. Para este orden de reflexión el error medio en las predicciones es de +/-2dB.

Se propone una fórmula empírica para  $N \geq 1 - \frac{1.222}{\log_{10}(1-\alpha)}$  determinar el número de

reflexiones adecuado para los cálculos en función de la absorción media de la sala siendo N el nivel de reflexión y  $\alpha$  la absorción media de la sala.

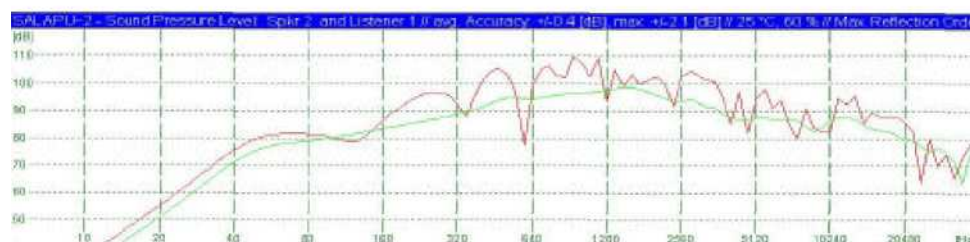
En la práctica, para salas complejas, esto constituye una limitación al uso de este software pues para salas no muy absorbentes el índice requerido es muy elevado y los tiempos de cálculo se disparan. Esto es especialmente cierto en salas que cuenten con elementos 3D en la geometría del modelo.

Para el caso de la sala elipsoidal estudiada, la absorción es muy elevada (60%) y el N requerido es igual a 4. Los cálculos para el estudio se realizaron con un nivel de reflexión máximo de 5.



*Absorción de la sala en función de la frecuencia (Fig. 7)*

La Fig. 8 muestra los resultados obtenidos para el nivel sonoro en el receptor. Podemos ver que el oyente no percibe ningún nivel asociado a sonido directo.



*Respuesta en frecuencia para el oyente (Fig. 8)*

También se determinó la direccionalidad percibida por el oyente. Esta se representa por una línea que oscila entre -1 y 1 para todo el rango de frecuencias.



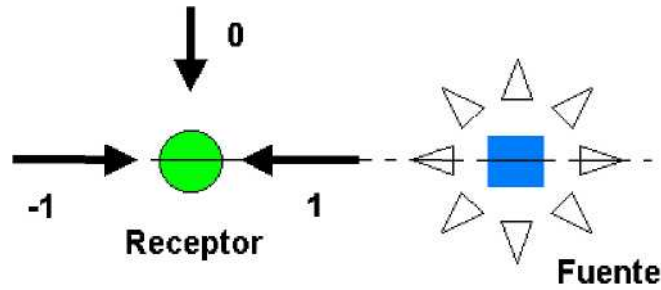
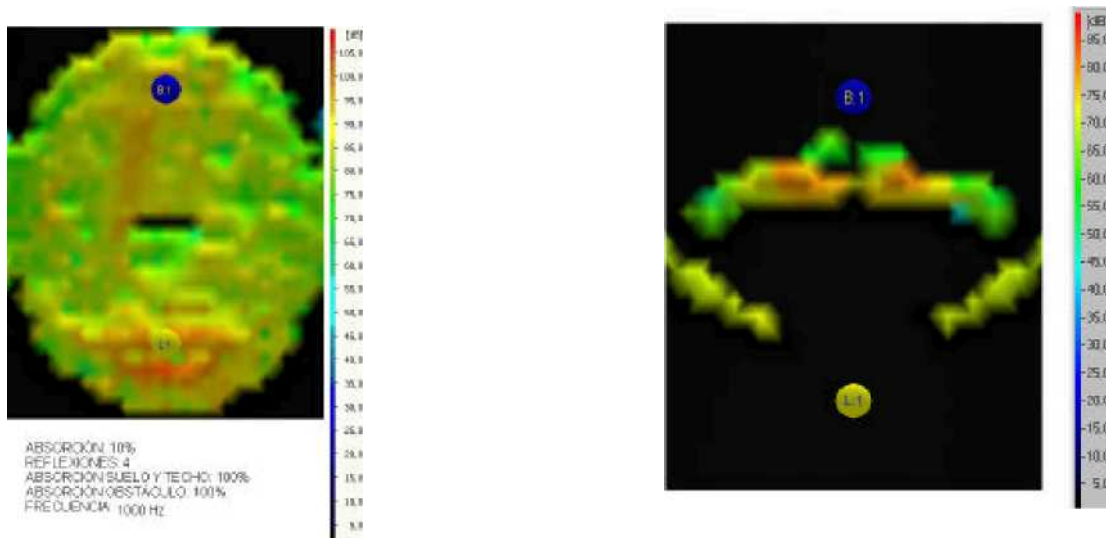


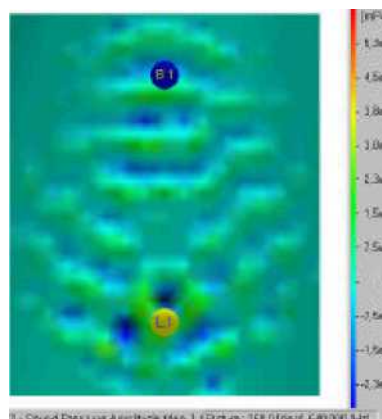
Fig. 9

El programa proporciona dos tipos de cálculo para el campo: la respuesta del campo en frecuencia y la respuesta temporal del primer frente de onda. Para cada frecuencia se puede analizar también el nivel percibido en cada dirección. Los resultados se obtienen en forma de animación para tiempos o frecuencias crecientes según el caso. Las siguientes figuras (10,11 y 12) son capturas de pantalla de la salida de resultados del programa con un pequeño texto identificativo de las condiciones de cálculo.

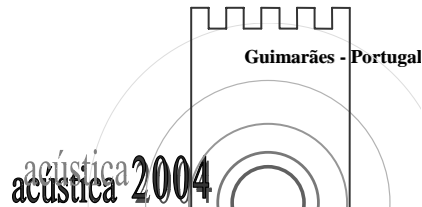


Respuesta del campo a 1000Hz (Fig. 10)

Primer frente de onda para  $t = 6ms$  (Fig.11)



Respuesta para la frecuencia de 640Hz y 260° (Fig. 12)



A partir de los espectros del susurro y del receptor se ha calculado la ganancia en escala ponderada, estando en torno a los 16 dBA.

También se realizaron cálculos de auralización para distintas grabaciones correspondientes a la lectura del poema "*Instrumento músico*" de *Luis Cernuda*, por parte de oradores hombre y mujer. Las lecturas se realizaron en tono de susurro y se montaron archivos de sonido comparando la lectura directa y el sonido auralizado.

### 3. MODELO REAL

Durante más de 6 meses se han elaborado diferentes propuestas hasta llegar a la que se ha realizado. Las modelizaciones realizadas han permitido presuponer los problemas con que nos encontraríamos en la realidad y corregirla hasta adaptarla a nuestros objetivos.

Para salvar los problemas constructivos se descartó la construcción con hormigón aligerado porque el descimbrado con un único molde planteaba problemas de timing y se decidió fabricar los dos casquetes con cuatro elementos cada uno a base de resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio que agilizó aunque también encareció su construcción

El susurrador fue ubicado en el antiguo claustro del Convento de San Agustín (Barcelona). Las medidas "in situ" dieron un nivel de ruido de fondo interior y exterior debido a los pajarillos y el fondo sonoro de la ciudad fue de 50 dBA. La ganancia resultante en el caso de emisores y receptores orientados hacia los casquetes es superior a 14 dBA.

### 4. CONCLUSIONES

Se ha probado que utilizando un software de bajo costo y mediante técnicas adecuadas y herramientas de fácil acceso, pueden ser estudiadas salas de geometría compleja, como es el caso del "Instrumento Músico", que no es posible abordar mediante "demos" (gratuitas) de programas comerciales de gran coste.

Las "ganancias" resultantes medidas "in situ" con sonido directivo de foco a foco está entre 10 y 14 dBA. En el caso de emisores y receptores orientados hacia los casquetes ésta es superior a 14 dBA, valor muy próximo al obtenido mediante la modelización, 16 dBA. Esta amplificación de la sala ha permitido la comunicación mediante susurros a pesar de los 2,5 metros que separan el foco receptor del emisor y todo en ausencia de señal directa emisor-receptor.

Finalmente, el público asistente y participativo ha quedado gratamente sorprendido e impresionado al susurrar el verso debido a la ganancia superior a los 14 dbA en las condiciones menos favorables. La experiencia demuestra que es factible hacer cómplices a los visitantes del "susurrador" en este tipo de intervenciones sonoras. Si al público que pasea por la ciudad se le ofrecen mobiliarios urbanos basados en efectos sonoros positivos, no solo participa de este arte sino que experimenta con sus principios físicos. Arte, ciencia y técnica se reúnen en el campo sonoro cuando los esfuerzos se distribuyen en equipos especializados

Las figuras siguientes muestran detalles del proceso de construcción y la sala acabada.





Fig.13

## REFERENCIAS

- [1] CARA Room Acoustics 2.2 PLUS. [www.cara.de/index.html](http://www.cara.de/index.html); [www.gt2games.com](http://www.gt2games.com)
- [2] Blender ([www.blender3d.org](http://www.blender3d.org)).
- [3] MLSSA Acoustical Measurement System [www.mlssa.com](http://www.mlssa.com)

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Investigación coordinado BIA2003-09306-CO4, financiado por el Plan Nacional de I+D.