



41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

ACUSTICA VIRTUAL DEL ESCENARIO DEL GRAN TEATRO FALLA DE CÁDIZ

PACS: 43.55.Ka

Miguel Galindo; Sara Girón; Teófilo Zamarreño.
Departamento de Física Aplicada II,
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC),
Universidad de Sevilla.
Avda. Reina Mercedes 2,
41012 Sevilla,
Tel: +34 954556612, Fax: +34 954557892,
E-mail: mgalindo@us.es, sgiron@us.es, teofilo@us.es.

ABSTRACT

In this work a simulation of the stage acoustics of a horseshoe proscenium theatre in Andalusia (southern Spain) has been carried out by means of Catt-Acoustic software. Two configurations of the stage with and without the orchestra shell present are analyzed. The quality of stage acoustic support has been evaluated by using the early and late acoustic support parameters (ST_{Early} and ST_{Late}), studied in their spectral behaviour at various microphone positions. The influence of the orchestra shell and of the displacements of the source along a circumference, centred at the reception position and of a one-metre radius, on the support acoustic parameters has been researched.

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una simulación de la acústica del escenario de un teatro de proscenio tipo herradura en Andalucía (sur de España) utilizando la herramienta informática CATT-Acoustic. Se han estudiado las dos configuraciones del escenario: con y sin concha acústica. La calidad del apoyo acústico del escenario se ha evaluado mediante el conocimiento del comportamiento espectral de los parámetros acústicos soporte de escena inicial y final (ST_{Early} y ST_{Late}), en las diversas posiciones del micrófono. Se ha investigado la influencia en los parámetros acústicos de la concha acústica y de los desplazamientos de las posiciones del emisor sobre una circunferencia centrada en el receptor y de radio un metro.

SOPORTE OBJETIVO DEL ESCENARIO

Las propiedades acústicas del escenario representan un importante elemento para las condiciones de interpretación de un músico integrante de una orquesta de música clásica. Los intérpretes en una orquesta precisan de dos requerimientos esenciales: una buena audición de su propio instrumento de forma que no sea necesario forzarlo para desarrollar el tono (apoyo ó *support*), y también del resto de los instrumentos de la orquesta de modo que pueda tocar con

precisión en ritmo, afinado, equilibrado en nivel, timbre y expresión (conjunto ó *ensemble*). El concepto de soporte o apoyo fue descrito por Knudsen en 1931 [1], sin embargo las primeras investigaciones sistemáticas sobre los requisitos acústicos para los músicos fueron publicadas en 1978 por Barron [2] y por Marshall *et al.* [3]. En 1989 Gade [4], realiza experimentos subjetivos con músicos en el laboratorio y en orquestas reales, para estudiar las propiedades del campo sonoro que influyen sobre la impresión de los músicos y propone los parámetros soporte de escena (ST) como parámetros objetivos que se correlacionan notablemente bien con los juicios subjetivos promediados. Se han estudiado dos versiones diferentes del soporte de escena: el parámetro de soporte inicial (early support, ST_{Early}), para la impresión de *conjunto* y *apoyo*; y el parámetro de soporte final (late support, ST_{Late}) para la impresión de *reverberación*. Los dos parámetros han sido recogidos en la norma ISO 3382-1 [5], en el Anexo C con carácter informativo. Los parámetros se definen matemáticamente como:

$$ST = 10 \log \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01s} p^2(t) dt} \right] \quad (dB) \quad (1)$$

donde $t=0$ representa la llegada del sonido directo y ST_{Early} integra el sonido reflejado inicial con límites $t_1=20$ ms y $t_2=100$ ms, en relación con la energía emitida desde la fuente (sonido directo y reflexión en el suelo a 1 m). No se ha establecido un límite de discriminación subjetiva para ST_{Early} pero se ha sugerido que una diferencia de 2 dB es probablemente significativa para un músico [6]. Para ST_{Late} los límites para el sonido reflejado son $t_1=100$ ms, y $t_2=1000$ ms. Las medidas se realizan en bandas de octava y se trabaja con el resultado promediado aritméticamente entre 250 Hz y 2000 Hz.

En la norma ISO se han recogido las principales recomendaciones de Gade [7] para la medida de estos parámetros, con excepción de medir más allá de 4 m de cualquier superficie reflectante, que ha sido reducida a 2 m.

EL GRAN TEATRO FALLA

Ubicado en Cádiz y construido en 1905, en él se realizan diferentes tipos de actividades culturales como ópera, teatro, danza, cine y conciertos. Es un teatro de proscenio que presenta planta en forma de herradura con una relación fija público-escena y una presentación frontal. Su escena desnuda presenta paredes de hormigón pintado y dispone de foso de orquesta. Su concha orquestal tiene forma cúbica con paredes de contrachapado de roble de 4 mm de espesor y el techo es horizontal formado por 4 paños de policarbonato de 3x12 m montado sobre una estructura portante de aluminio.

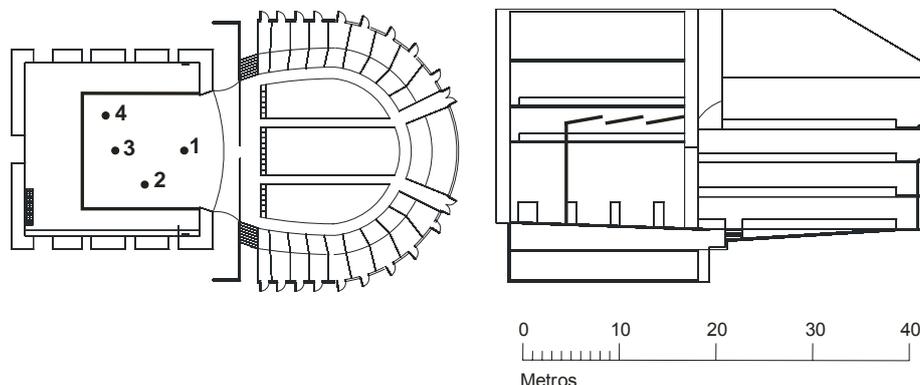


Figura 1. Planta, sección longitudinal, escala orientativa y puntos de recepción medidos.



Figura 2. Vista interior con la concha acústica instalada y con las sillas de los músicos presentes.

En la Figura 1 se muestra la planta y la sección longitudinal del recinto escénico, una escala orientativa y los puntos de recepción para la medida del soporte de escena. La Figura 2 muestra una fotografía con la concha acústica instalada y con las sillas de los músicos en la escena. Asimismo, en la Tabla 1 se presentan algunos de los datos geométricos más relevantes relacionados con el escenario del teatro.

Tabla 1. Datos relevantes del Gran Teatro Falla de Cádiz.

Asientos		1038
SIN CONCHA	Tiempo de reverberación (s)	1.87
	Volumen total (m ³)	13670
	Volumen de escena (foso o incluido) (m ³)	5556
	Anchura media en la sección de cuerdas (m)	18
	Altura hasta el peine (m)	17.3
	Profundidad (valor medio) (m)	17.6
CON CONCHA	Tiempo de reverberación (s)	1.84
	Volumen total (m ³)	9842
	Volumen de escena (foso o incluido) (m ³)	1728
	Anchura media en la sección de cuerdas (m)	12
	Altura (m) (evaluada según propuesta de Dammerud [8])	12
	Profundidad (valor medio) (m)	12

MÉTODO EXPERIMENTAL

Se han utilizado los procedimientos establecidos en [5] y las medidas se llevaron a cabo sin la presencia de público ni músicos; con el telón cortafuegos levantado, la fuente en el escenario y no se ha medido en el foso de orquesta. Se controlaron la temperatura y la humedad relativa mediante un termo-higrómetro de precisión. El rango de variación de estos parámetros es de 23.8-23.9 °C y 59-60% en la medida con la concha de orquesta y entre 14.1-15.3 °C y 47-48 % sin la concha. Se midieron las respuestas al impulso (RI) monoaurales que posteriormente fueron procesadas para obtener los parámetros de soporte de escena para cada banda de octava en el rango de frecuencias comprendido entre 125 y 4000 Hz, en cada receptor.

Las respuestas al impulso se ha obtenido mediante barridos sinusoidales generados y analizados por el programa WinMLS 2004 mediante una tarjeta de sonido VX Pocket v2 de Digigram. La fuente omnidireccional DO-12 de 01-dB Stell se sitúa a 1 m del suelo. Los

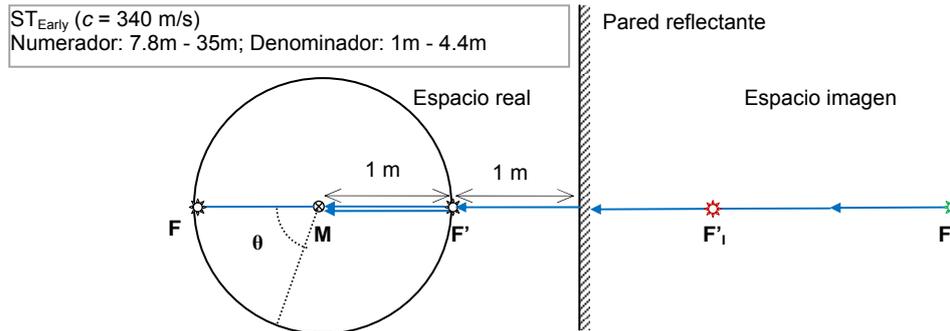


Figura 3. Disposición relativa incorrecta (F') o correcta (F) de fuente-micrófono (M).

micrófonos de 1/2 pulgada omnidireccionales B&K 4190 (con un preamplificador B&K 2669 polarizado por la fuente y acondicionador de señal OPUS de 01dB) se sitúan a 1 m del suelo con una distancia fuente-receptor también de 1 m.

Atendiendo al requerimiento de que las medidas se deben realizar a más de 2 m de distancia de cualquier superficie reflectante y teniendo en cuenta las pequeñas dimensiones de estos teatros de prosenio, se propone una posible disposición de fuente-micrófono que permitiría acceder a un área de recepción mayor. La Figura 3 muestra que en la posición de fuente F', la reflexión que llega al micrófono desde su imagen (F₁ en el espacio imagen) proviene de una distancia de 3 m y estaría incluida por tanto en la integral del denominador de los parámetros ($t = 3 \text{ m} / 340 \text{ m/s} = 8.82 \text{ ms}$). En cambio la reflexión que llega de la posición de fuente F, proviene de una imagen (F₁) que se encuentra a 5 m, y por tanto no es incluida en la integral del denominador de los parámetros. De hecho, posiciones de la fuente F, situadas sobre la circunferencia con $\theta \leq \pm 72^\circ$ cumplirían la correcta especificación.

SIMULACIONES ACÚSTICAS

Se ha utilizado el programa de simulación acústica CATT-Acoustic [9] y los cálculos se han implementado mediante el nuevo motor de cálculo TUCT (*The Universal Cone-Tracer*) que emplea el algoritmo de trazado de conos sin corrección estadística de cola. El sonido directo y las primeras reflexiones especulares difusas son deterministas.

Los valores medidos in situ de la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa del aire y las distancias fuente-receptor se usaron como datos de entrada para evitar posibles fuentes de error. Se han aceptado las estimaciones automáticas del programa respecto al

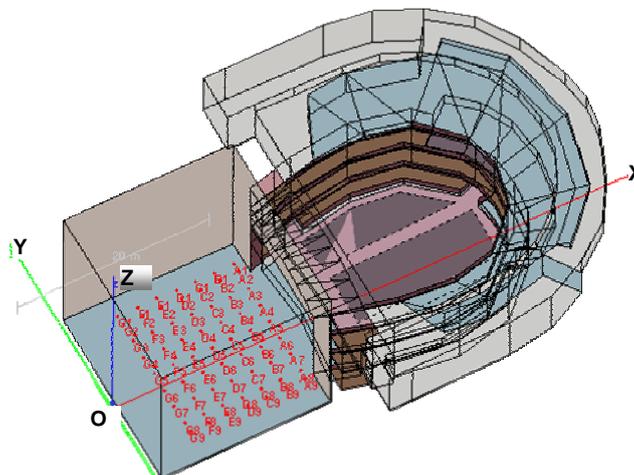


Figura 4. Vista general del modelo 3D y la malla de fuentes utilizada.

número de rayos y al tiempo de truncado con la condición de que éste último cumpla el requerimiento de ser del orden del tiempo de reverberación. Todas las superficies han sido caracterizadas para la simulación por sus correspondientes coeficientes de absorción y scattering para las bandas de octava desde 125 a 4000 Hz. En la Figura 4 se muestra el modelo 3D creado para el Gran Teatro Falla de Cádiz sin la concha acústica instalada y la malla de fuentes utilizada. Los receptores se encuentran intercalados entre ellas, a un metro en la dirección del eje OX, de forma que para cada receptor se puede obtener el soporte de dos posiciones de fuente (delante-detrás). Las diferentes superficies aparecen coloreadas según las características acústicas de cada una de ellas. El modelo completo del teatro se ha calibrado a partir de los valores medidos del tiempo de reverberación siguiendo la metodología implementada en [10].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 5a y 5c se presentan los mapas de color de los valores de ST_{Early} y ST_{Late} promediados en las bandas de octava de 250 a 2000 Hz para los diferentes puntos de recepción sin la presencia de la concha acústica. Los valores responden a fuentes posicionadas 1 m por delante de cada receptor, atendiendo al mallado propuesto en la Figura 4. El rango de variación de valores es mayor en el caso de ST_{Early} con diferencias de 6.5 dB frente a 2.3 dB del ST_{Late} . Esta mayor variación es inherente a la definición de ambos parámetros, pues en el primer caso se está tratando con las primeras reflexiones discretas. Además, para ST_{Early} , se observan zonas que pueden significar una diferencia subjetiva en el apoyo para los intér-

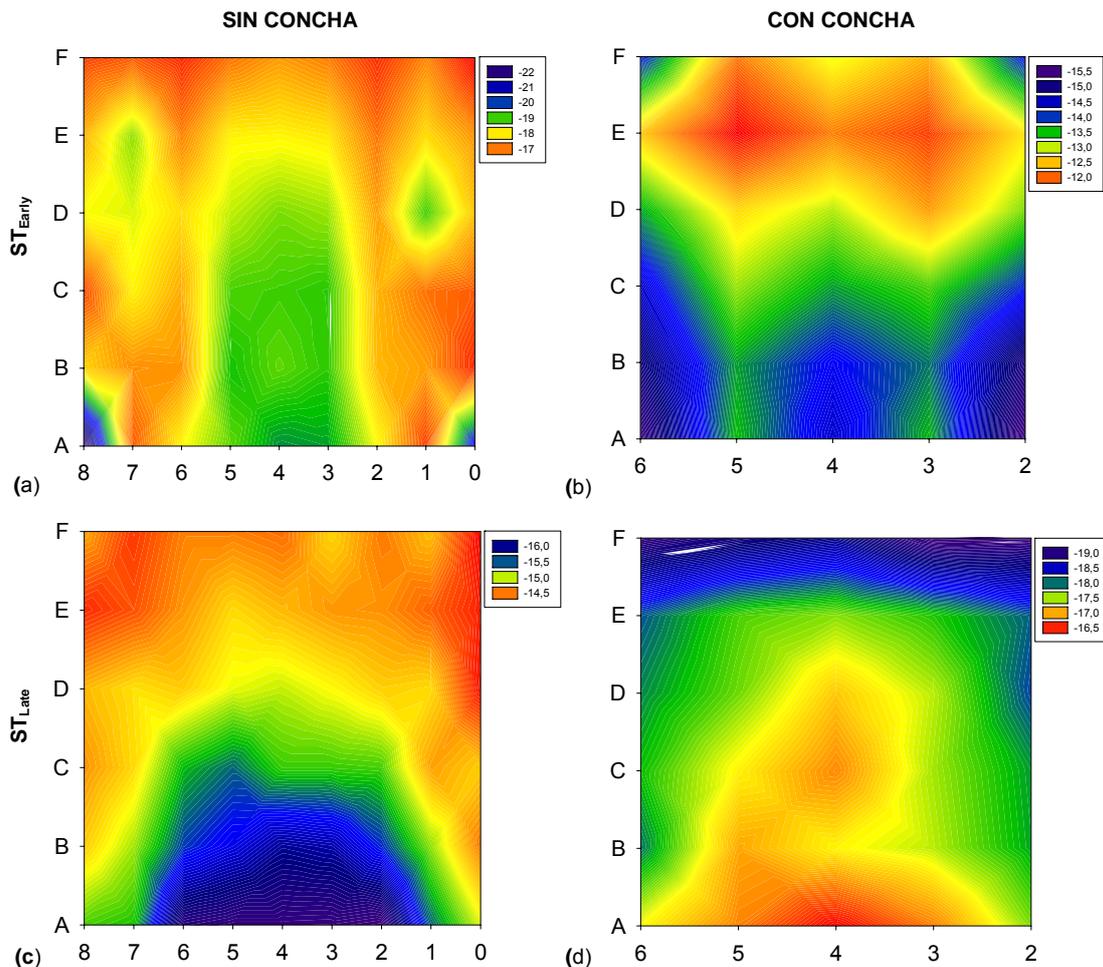


Figura 5. ST_{Early} (arriba) y ST_{Late} (abajo) simulados en la malla de receptores, para las configuraciones sin concha acústica (izquierda) y con la concha acústica instalada (derecha).

pretos, donde una gran zona central y más cercana a la sala presenta los valores más bajos del parámetro. Sin embargo, los valores de ST_{Late} , sugieren que la impresión de reverberación de la sala es más uniforme para todos los intérpretes.

En las Figuras 5b y 5d se presentan los mapas de color análogos a los anteriores para ST_{Early} y ST_{Late} , pero para la configuración con la concha acústica instalada. Los valores de ST_{Early} son más altos que los resultados obtenidos sin la concha acústica, con un refuerzo de reflexiones iniciales y un rango de variación más pequeño (4 dB). Las posiciones con valores más pequeños se sitúan en la mitad más cercana a la sala. Es la zona habitual de colocación de la sección de cuerdas de la orquesta. Para el soporte final los valores disminuyen con un ligero incremento del rango de variación (2.8 dB).

Hemos de aclarar que, con el fin de conseguir una mayor discriminación, se ha utilizado una escala de color diferente para cada uno de los mapas de la Figura 5.

Existen 45 posiciones del micrófono, intercaladas entre la malla de fuentes de la Figura 4, para cada una de las cuales es posible determinar los valores de los parámetros de soporte de escena para sendas posiciones del emisor, una situada delante y la otra detrás, a 1 m del micrófono, en la dirección del eje OX. Con ello se pretende estudiar la posible variación de los valores de los parámetros en las posiciones fuente-receptor que se describirían en torno a la circunferencia de centro en la posición del receptor. Para la configuración de la escena SIN la concha acústica, los valores medios del valor absoluto de las diferencias entre la posición anterior y posterior son 0.62 dB para el ST_{Early} y 0.20 dB para el ST_{Late} . La desviación estándar correspondiente es de 0.60 y 0.16 dB, respectivamente. Las máximas diferencias son de 2.66 dB para el parámetro de soporte inicial y 0.63 dB para el de soporte final. Teniendo en cuenta estos datos, el posible valor obtenido para el parámetro soporte objetivo inicial puede dar lugar a variaciones cercanas al posible limen subjetivo propuesto. Esto parece indicar la debilidad de la definición del parámetro objetivo, principalmente en lo referente a la direccionalidad de las reflexiones. Similares conclusiones se pueden inferir del trabajo de Arau [11]. Los resultados que se obtienen cuando la concha de orquesta está instalada son análogos a los anteriores.

Por otra parte, queremos investigar la fiabilidad de la simulación con respecto a los valores medidos. Como en las medidas los receptores se situaron 1 m por delante de la fuente, se utilizarán los correspondientes valores simulados a efectos de comparación. En la Tabla 2 se presenta los valores promediados espectralmente (entre 250 y 2000 Hz), medidos y simulados de ST_{Early} y ST_{Late} para las dos configuraciones. Si no está la concha acústica instalada, los valores del *soporte inicial* difieren notablemente de los simulados (4.65 dB en promedio en valor absoluto), mientras que el *soporte final* resulta más aceptable (diferencia promedio en valor absoluto de 0.95 dB). La situación contraria ocurre con la concha acústica instalada.

Tabla 2. Valores medidos y simulados (dB) del soporte de escena inicial ST_{Early} y final ST_{Late} .

	Medidos sin concha		Simulados sin concha		Medidos con concha		Simulados con concha	
	ST_{Early}	ST_{Late}	ST_{Early}	ST_{Late}	ST_{Early}	ST_{Late}	ST_{Early}	ST_{Late}
Punto 1	-16.3	-16.1	-19.7	-15.8	-13.4	-14.0	-13.8	-16.9
Punto 2	-13.3	-15.2	-17.0	-14.8	-12.6	-14.0	-13.9	-17.8
Punto 3	-11.7	-12.3	-18.2	-14.6	-12.6	-15.1	-12.1	-17.6
Punto 4	-11.8	-13.1	-16.8	-14.3	-12.5	-16.4	-12.8	-18.5

Por último, en la Tabla 3, se comparan los resultados promediados espacialmente, para las diferentes bandas de octava, del soporte de escena *inicial* y *final*. Asimismo, la presencia de la concha no supone un incremento neto en los valores de ST_{Early} medidos, posiblemente debido al techo de la concha acústica [12]. Lo contrario ocurre con los valores simulados, que supone un incremento de las reflexiones iniciales en la escena. Para ST_{Late} la presencia de la concha acústica disminuye los valores de las frecuencias de 250 y 500 Hz y los incrementa para 1000 y 2000 Hz. Los simulados, sin embargo disminuyen los valores del soporte final a todas las frecuencias.

Tabla 3. ST_{Early} y ST_{Late} (dB) promediados espacialmente en bandas de octavas.

ST_{Early}	Concha	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Medido	No	-14.3	-12.5	-13.4	-12.8
	Sí	-14.1	-13.3	-12.2	-11.5
Simulado	No	-17.6	-18.1	-18.4	-18.3
	Sí	-13.9	-13.2	-12.7	-12.8
ST_{Late}	Concha	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Medido	No	-12.3	-13.4	-15.1	-16.0
	Sí	-16.0	-14.9	-14.7	-13.8
Simulado	No	-14.1	-15.0	-14.8	-15.7
	Sí	-19.3	-18.2	-17.1	-16.3

CONCLUSIONES

Se ha propuesto una posible disposición de fuente-receptor que mantiene las exigencias de la medida especificadas en [5] y que permite acceder a posiciones cercanas a las paredes, que son utilizadas por los músicos en el escenario. Se pone de manifiesto la debilidad del parámetro soporte objetivo por su dependencia de la posición de la fuente en torno a una circunferencia de 1 m, con centro en el receptor. Este parámetro no puede dar cuenta del carácter direccional de la energía. No obstante los valores simulados se alejan sensiblemente de los medidos. Esto sucede tanto globalmente como en su comportamiento espectral, lo que sugiere buscar un mejor factor de ajuste del modelo tridimensional para simular los valores de estos parámetros con una mayor precisión.

RECONOCIMIENTOS

Esta comunicación es parte del trabajo realizado en el proyecto de investigación I+D+i coordinado, con referencia BIA2003-09306-CO4-02.

REFERENCIAS

- [1] V.O. Kundsen, "Acoustics of music rooms". J. Acoust. Soc. Am. **2**, 424-467 (1931).
- [2] M. Barron, "The Gulbenkian Great Hall. Lisbon II: An acoustic study of a concert hall with variable stage". J. Sound Vib. **59**, 481-502 (1978).
- [3] A.H. Marshall, D. Gottlob, H. Alrutz, "Acoustical conditions preferred for ensemble". J. Acoust. Soc. Am. **64**, 1437-1442 (1978).
- [4] A.C. Gade, "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Method and laboratory experiments". Acustica **69**, 193-203 (1989). Part II: "Field experiments and synthesis of results". Acustica **69**, 249-262 (1989).
- [5] International Standard ISO 3382-1:2009(E). Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Performance spaces, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2009).
- [6] J.Y. Jeon, M. Barron, "Evaluation of stage acoustics in Seoul Arts Center Concert Hall by measuring stage support". J. Acoust. Soc. Am. **117**, 232-239 (2005).
- [7] A.C. Gade, "Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms". Proceedings of the 14th ICA Beijing, (1992).
- [8] J.J. Dammerud, M. Barron, "Concert hall stage acoustics from the perspective of the performers and physical reality". Proceedings Inst. of Acoustics, **30**(3) (2008).
- [9] CATT-Acoustic v8h, user's manual. *Room acoustics prediction and walkthrough auralization*. CATT, Gothenburg, Sweden (2008).
- [10] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. **126**, 1207-1218 (2009).
- [11] H. Arau, "Is Gade's support parameter ST_{Early} a sure method to forecast stage acoustics?". Proceedings of Internoise 2010, Lisboa, Portugal, 13-16 Junio (2010).
- [12] S. Girón, T. Zamarreño, M. Galindo, "Experimental study of support parameters on auditorium and proscenium stages". Acta Acustica united with Acustica, **96**, en prensa (2010).