

SIMULACIÓN ACÚSTICA DE UN TEATRO ROMANO: LA COLONIA CLUNIA SULPICIA

PACS: 43.55.+p

Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J. I.

Deptº de Física Aplicada – ETS de Arquitectura de Valladolid (España)

E-mail: gvallejortga@yahoo.es; jignacio@arq.uva.es

ABSTRACT

This work presents the most excellent conclusions of the acoustic study made in the theatre of Clunia, a Roman city placed near Coruña del Conde, in the province of Burgos (Spain). It shows the relations between geometry with the physical parameters that characterize the sound of a room and they have been analyzed by means of simulation. The reasons to chose this particular theatre are that it is an archeology ruin in a restoration process and it responds to a typologie of enclosures where acoustics were the most important challenge.

RESUMEN

Este trabajo presenta las conclusiones más relevantes del estudio acústico realizado en el Teatro de Clunia, ciudad romana localizada junto a Coruña del Conde, provincia de Burgos (España). En ellas se pondrá de manifiesto la relación de la geometría con los parámetros físicos que caracterizan el sonido del recinto y que se han analizado mediante simulación. Los motivos que han llevado a estudiar este teatro son que se trata de una ruina arqueológica en proceso de restauración y que responde a una tipología de recintos en donde la acústica y la buena audición constituyeron para sus constructores un reto fundamental.

MODELIZACIÓN Y MATERIALES

El estudio acústico del teatro de Clunia se ha realizado en función de la utilización que pudo tener este recinto, que sería fundamentalmente para representaciones, por tanto basado en el uso de la palabra; también cabría pensar en la combinación ocasional de palabra y música. Por ello se han escogido distintos parámetros que serán analizados mediante simulación; algunos caracterizan los recintos destinados a palabra, otros los dedicados a música, otros a ambos.

Todos los parámetros, tales como el tiempo de reverberación RT, el nivel de presión sonora SPL o el RASTI, son definidos con el objeto de adaptar algo que es medible a la fisiología del oído. Para la simulación se ha realizado un modelo acústico partiendo de un dibujo del teatro en tres dimensiones, que nos caracteriza su geometría, usando el programa AUTOCAD y seguidamente se ha operado con el programa CATT Acoustic, dedicado específicamente al problema de la propagación, reflexión y difusión del sonido. Este software utiliza varios algoritmos de cálculo, cuyos resultados pueden ser comparados, tales como el trazado de rayos para las primeras reflexiones o el basado en la propagación del sonido por conos, que es el que proporciona una información más exhaustiva y fiable¹.

El teatro romano de Clunia se encuentra actualmente en estado de ruina en proceso de incipiente restauración. Por ello el modelo realizado ha partido necesariamente de una reconstrucción ideal del mismo, plasmada en los dibujos y planos del arquitecto Miguel Ángel de la Iglesia², basados tanto en la información que se ha podido obtener en la propia ruina arqueológica como en prácticas constructivas ya conocidas de otros teatros romanos.

Los planos arrojan unas dimensiones del teatro muy considerables, con una distancia de 56m entre un orador situado a tres metros del borde del escenario y un oyente de la última fila en dirección frontal; el escenario tendría una anchura de 50m y una profundidad en torno a 10m. La orquesta, de forma semicircular, tendría alrededor de 13m de radio. El aforo estimado en la bibliografía consultada estaría en torno a las 8000-9000 personas³.

A partir de los planos se ha construido el modelo tridimensional para el estudio acústico (figura1). El software obliga a realizar algunas adaptaciones que describimos a continuación:

- a) El perímetro semicircular de la planta del teatro se ha transformado en una poligonal, ya que el programa no admite líneas curvas. El dibujo del pórtico por encima de la cavea superior, cuyo semicírculo barre un ángulo de 186°, se simplifica en función de la disposición de las escaleras a lo largo de las caveas. El resultado es una modelización del perímetro en 18

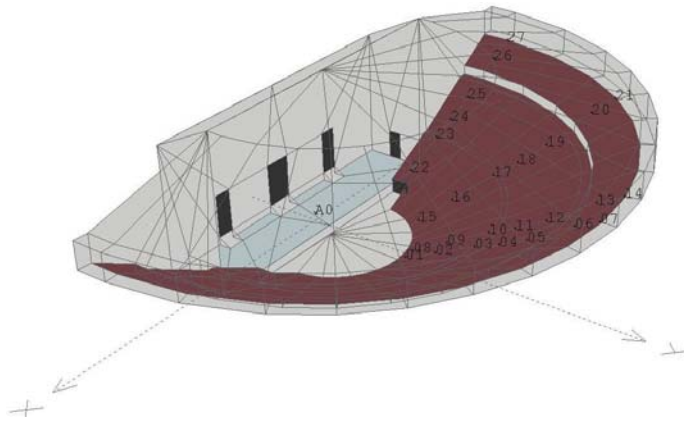


Figura 1.- Modelización del teatro

lados no iguales, pero conservando la misma simetría del teatro con respecto al plano yz.

- b) Las exigencias del software obligan a transformar la planta circular de las columnas en planta poligonal. En este punto se plantearon dos opciones: una consideraba el friso columnar del scenae frons, así como las 64 columnas del pórtico perimetral tras la cavea superior; otra suprimía las columnas considerando difusoras las superficies próximas a las mismas.

Tras sopesar ambas posibilidades, se decidió optar por la segunda, suprimiendo las columnas, ya que la primera habría añadido grandes dificultades al programa de cálculo y los resultados no habrían sido necesariamente más fiables, al no conocer la disposición de cada elemento del scenae frons. En favor de la segunda opción, sí sabemos que el comportamiento global de los scenae frons romanos es altamente difusor debido a las múltiples irregularidades en sus superficies (columnas, repliegues, esculturas).

- c) El software analiza la acústica de recintos cerrados y no a cielo abierto como son los teatros griegos y romanos, lo que se ha solventado en la modelización cerrando el teatro mediante un techo de máxima absorción. Ello se basa en el concepto de absorción máxima (**absorción entendida como no reflexión**) que tiene una superficie abierta (ventana), ya que el sonido la atraviesa libremente sin que ninguna porción de energía sonora sea reflejada. El diseño del techo parte del tornavoz y, considerando la distribución poligonal del pórtico perimetral, conecta con el techo de dicho pasillo. El volumen obtenido al cerrar el teatro es de 86800m³.

En base al modelo, se describen los elementos del teatro que intervienen en su acústica:

- Scenae frons: Tratado como una superficie de mármol altamente difusora. Las puertas, tres frontales y dos laterales, abiertas, se consideran de máxima absorción.
- Escenario: Se considera de tarima de madera sobre rastreles, y, por tanto, reflectante.
- Orquesta: Tratada como superficie de mármol reflectante. La orquesta tiene primordial importancia en estos recintos ya que envía reflexiones a gran parte del público, dependiendo de la posición del orador en la escena; si es más adelantada recoge más reflexiones, si está más atrás, el sonido que reflejaría la orquesta es interceptado por el suelo del escenario, pasando éste a reflejarlo.

Varios libros consultados consideran la parte perimetral de la orquesta con gradas ocupadas por autoridades. En este modelo no se ha plasmado, con lo que se supone que la orquesta envía sonido reflejado a todo el público. En caso de existir las gradas (dibujadas por el arquitecto), se interceptarían algunas reflexiones, las que irían a parar al público de la cavea baja y primeras filas de la cavea media. Las reflexiones dirigidas a la cavea superior y restantes filas de la cavea media no serían interceptadas.

- Tornavoz: Tratado como una superficie de madera arrastrelada y, por tanto, reflectante. Los dibujos de la bibliografía consultada muestran tornavoces con hendiduras en sus superficies (artesonado), con lo que se considerará también difusor.

Una cuestión de interés es la inclinación del tornavoz respecto a la horizontal. En el modelo adoptado, basado en los estudios sobre el tornavoz del teatro romano de Orange, la inclinación es de 26°, provocando reflexiones en la cavea inferior y primeras filas de la cavea media. Este dato es importante, ya que, **aún considerando las gradas de autoridades en la orquesta, la acción combinada del tornavoz y la orchestra garantizarían una reflexión en la práctica totalidad de las gradas, abarcando el tornavoz la parte delantera del teatro y la orchestra la trasera.** Incluso algunos espectadores de la cavea media se beneficiarían de ambas reflexiones.

- Caveas: Dada la alta densidad de público, superior a 2 personas/m², sus superficies se consideran muy absorbentes, sobre todo en frecuencias altas. Los pasillos de escalera, al ser estrechos, se incluyen como zona de público por recomendación del software, y más teniendo en cuenta la densidad de público aún añadiendo estas superficies.

Se ha modelizado una inclinación similar en las tres caveas, 26.6° la cavea inferior, 27.3° cavea media y 26.9° la cavea superior, lo que provoca según el diseño del arquitecto un muro en el pasillo tras la cavea media, que sirve de separación entre ésta y la cavea superior. Esta pared es tratada como superficie de mármol reflectante.

- Pórtico perimetral detrás de la cavea superior: Este pasillo con techo, descrito por Vitruvio, estaría flanqueado por columnas en el perímetro que limita con la cavea superior, y por una pared en su perímetro más externo. La acción combinada de la pared y el techo produce reflexiones en las últimas filas de la cavea superior, si bien habría que tener en cuenta la presencia de las columnas, que contribuirían difundiendo el sonido. De esta manera hemos modelizado las superficies del suelo de este pasillo, su pared perimetral y techo como mármol moderadamente difusor.
- Techo de cierre: Por necesidad del software se ha modelizado este techo, tratado como superficie de máxima absorción (99.9%; el programa no trabaja con el 100%).

Damos a continuación la propuesta de superficies de revestimiento con sus datos de absorción y difusión (en tanto por ciento) en las bandas de octava de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz y 4kHz. Los datos se basan en la información proporcionada por el software y la bibliografía consultada⁴. Se resumen en la siguiente tabla:

MATERIALES	ABSORCIÓN	DIFUSIÓN
Mármol reflectante para la orchestra, el muro de separación entre las caveas media y superior y las paredes laterales que flanquean el hueco de la escena	1 1 1 1 2 2	
Mármol semidifusor para el suelo, paredes y techos del pasillo circundante tras la cavea superior	1 1 1 1 2 2	15 20 25 30 35 35
Mármol difusor para las escaleras y las paredes frontales y laterales del scenae frons	1 1 1 1 2 2	30 40 50 60 70 70
Ventana para el techo de cierre del teatro y para las puertas centrales y laterales del scenae frons y puertas laterales de la orchestra	99.9 99.9 99.9 99.9 99.9 99.9	
Madera sobre rastreles para el suelo del escenario	19 14 9 6 6 5	
Madera difusora sobre rastreles para el tornavoz	19 14 9 6 6 5	30 40 50 60 70 70
Zona de audiencia con alta densidad de público para las caveas inferior, media y superior incluyendo los pasillos y escaleras entre ellas	52 68 85 97 93 85	30 40 50 60 70 70

ESTUDIO ACÚSTICO

Supondremos una fuente omnidireccional A0 centrada en el ancho del escenario, a 3m del borde y 1.5m de altura sobre el mismo, que emite un nivel de presión sonora de 90dB a 1m de distancia en todas las bandas de octava (125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz y 4kHz). Además, según se mira desde la escena al público, se han colocado en el lado izquierdo del plano de simetría yz veintisiete receptores dispuestos en cuatro direcciones axiales (ver figura1), recorriendo las tres caveas. Sobre los receptores el programa vierte una información más exhaustiva. Describiremos los parámetros objeto de estudio y analizaremos los resultados⁵:

- Nivel de presión sonora SPL:

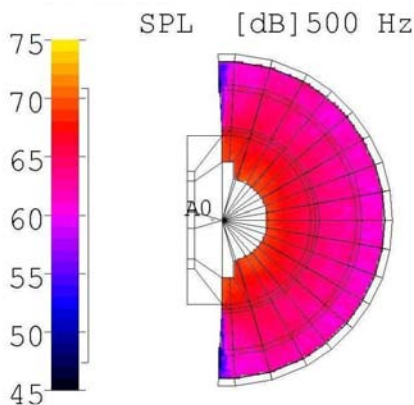


Figura 2- Nivel de presión sonora SPL en la zona de audiencia a 500Hz

El resultado en el plano de audiencia para la frecuencia de 500Hz se muestra en la figura2. Los valores de SPL para el conjunto de las bandas de octava oscilan entre 60-70dB, siendo relativamente bajos en las últimas filas, algo que resulta razonable teniendo en cuenta las dimensiones del teatro. Cabe destacar una gran homogeneidad de los niveles de intensidad en las distintas localidades, salvo las zonas a las que no llega sonido directo en los extremos de los laterales (color azul). La pérdida de nivel sonoro entre espectadores de las primeras y últimas filas a lo largo de cada dirección axial es del orden de 6-7dB; en campo libre, teniendo en cuenta que la distancia al orador es el triple en las últimas filas que en las primeras, esta disminución habría sido de 9.5dB, 3dB más que la registrada.

- Tiempo de reverberación RT: El valor más representativo es RT_{mid} , que se obtiene como promedio de los valores en las bandas de 500Hz y 1kHz.

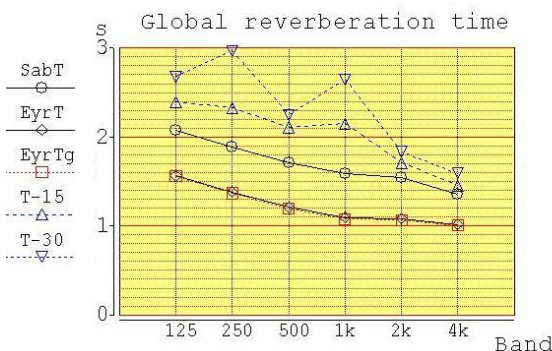


Figura 3.- Gráficas de los valores calculados del Tiempo de Reverberación

$$RT_{mid} = [RT(500 \text{ Hz}) + RT(1\text{kHz})]/2$$

Los valores recomendados del tiempo de reverberación RT_{mid} en recintos cerrados destinados al uso de la palabra se estima en 0.8-1.2seg, y para la palabra cantada en 1.2-1.5seg. Este rango está sujeto al volumen de la sala, concibiéndose los valores más elevados de estas horquillas para las salas con mayor volumen.

En la figura3 se muestran las gráficas de los valores de tiempo de reverberación, unos obtenidos mediante fórmulas, como las de Sabine y Eyring, otros, como el T-15 y T-30, calculados a partir de la geometría de la sala con sus superficies de revestimiento, así como de la posición de la fuente y receptores.

Nos fijaremos en la gráfica del T-15 por ser la más equilibrada a las distintas frecuencias y presentar valores intermedios entre los aportados por la fórmula de Sabine y el T-30. Se obtiene un valor para frecuencias intermedias $RT_{mid} = 2.13\text{seg}$, que resulta más elevado que los anteriormente citados como idóneos, pese a haber considerado un techo para el cerramiento muy absorbente. Ello es lógico, ya que en el

teatro de Clunia se está hablando de un aforo y volumen de cierre por lo menos cinco veces superior al de los grandes teatros cerrados de la actualidad. La cuestión más importante estará en ver hasta qué punto estos resultados van a afectar a la inteligibilidad de la palabra, lo que se analizará con los parámetros Definición D_{50} y, sobre todo, con el RASTI.

- Definición D_{50} : Se define como la relación entre la energía que llega al oyente antes de los 50 primeros milisegundos desde la llegada del sonido directo y la energía total recibida, dando una idea de la importancia de las primeras reflexiones que se integran con el sonido directo. Cuanto más elevado sea el valor de la Definición D_{50} , mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado, debiendo cumplir para cada punto de una sala ocupada y en cada frecuencia que $D_{50} > 0.50$.

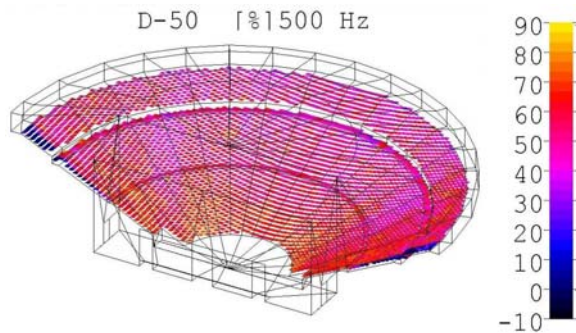


Figura 4.- Valores de la Definición D_{50} en la zona de audiencia a 500Hz

La figura4 muestra los valores⁶ de la Definición D_{50} a la frecuencia de 500Hz. Para todas las frecuencias los valores cumplen $D_{50} > 50$, salvo en las zonas de sombra de los laterales, siendo la media del valor obtenido en los veintisiete receptores $D_{50} = 65$. Por tanto, la Definición tiene unos resultados que contribuyen a reforzar la sonoridad y la inteligibilidad de la palabra.

- Eficiencia lateral LF: Se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 milisegundos excluyendo el sonido directo y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo. Este parámetro caracteriza los recintos que se dedican a música y da una idea del grado de especialidad del sonido, que aumenta con el número de reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente. Habitualmente se utiliza LF(4), valor medio de los LF obtenidos en las bandas de octava comprendidas entre 125Hz hasta 1kHz. En sala vacía debe cumplir: $LF(4) > 0.19$ (19 en tanto por ciento)⁷; cuanto más elevado sea, mayor será el grado de especialidad del sonido.

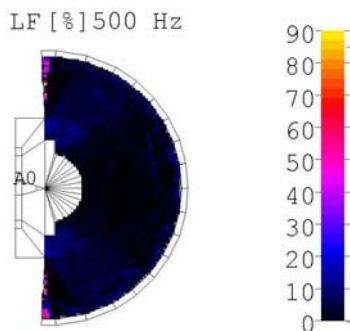


Figura 5.- Valores de la Eficiencia Lateral LF en la zona de audiencia a 500Hz

En la figura5 se muestran los valores de Eficiencia lateral LF a la frecuencia de 500Hz. El valor medio porcentual a 500Hz se sitúa torno a 3.3. El valor medio es $LF(4) = 3.5$, muy por debajo del valor mínimo de 19 en la inmensa mayoría de los asientos del público.

Este resultado no tiene especial trascendencia en la valoración acústica de este recinto, al ser destinado al uso de la palabra; lo que sí muestra es con esta tipología de teatros no se crea impresión espacial del sonido, debido al escaso número de reflexiones laterales, lo cual resulta lógico, ya que las reflexiones principales que provienen de la orquesta, del tornavoz, del scenae o del escenario no son laterales sino frontales.

- RASTI: Este parámetro permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). Se calcula a partir de la reducción a distintas frecuencias de los diferentes índices de modulación de la voz

debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala. Una sala destinada al uso de la palabra se considera con una inteligibilidad aceptable si tiene valores de RASTI desde 0.50, y buena desde 0.65 (para el software, desde 0.60)⁸.

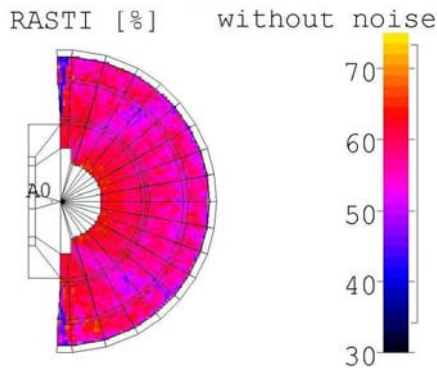


Figura 6.- Valores y gráfica de RASTI en la zona de audiencia

En la figura6 se muestran los valores de RASTI. Los resultados dan al teatro una categoría de “aceptable”, incluso “buena” en cuanto a la inteligibilidad de la palabra, ya que el RASTI supera en la mayoría de las localidades el valor porcentual de 60. La media de los veintisiete receptores da un valor de 62.5. El resultado se puede considerar muy bueno, teniendo en cuenta que el valor del tiempo de reverberación estaba por encima de los 2 segundos, lo que demuestra que **valores más elevados del tiempo de reverberación pueden ser compatibles con una buena inteligibilidad.**

Es interesante comentar los valores más bajos de RASTI en los espectadores 18 y 19 de la cavea media (ver figura1, y zonas ligeramente azuladas dispuestas simétricamente en la figura6); haciendo el estudio del ecograma asociado a estos dos receptores, vemos que están en la zona de sombra tanto de la orquesta como del suelo de la escena, no recibiendo reflexiones provenientes de esas superficies, a diferencia de los espectadores sentados en las filas anteriores (15, 16 y 17) y posteriores (20 y 21).

CONCLUSIONES FINALES

Resumimos en la siguiente tabla el conjunto de los resultados obtenidos:

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR DE SIMULACIÓN
Nivel de presión sonora SPL	60-70 dB
Tiempo de reverberación RT_{mid}	2.13 seg
Definición D_{50} (%)	65 dB
Eficiencia Lateral LF (%)	3.5
RASTI (%)	62

¹ CATT-Acoustic v8.0 User´s Manual, SPECTRA D´Sign Kopiering AB, Gothenburg, 2002.

² Para la consulta de los dibujos y planos de reconstrucción del teatro remitimos a las comunicaciones:

Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J.I.; de la Iglesia Santamaría, M.I. Estudio acústico del Teatro de Clunia. Actas del Congreso AR&PA 2008, en prensa.

Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J.I.; de la Iglesia Santamaría, M.I. La acústica del Teatro de Clunia a la vista de los escritos de Vitruvio. Actas del Congreso Tecniacústica 2009.

³ Palol, P de. El Teatro Romano de Clunia. Actas del Simposio “El Teatro en la Hispania Romana”. Badajoz, 1982.

Este libro cita y corrige la referencia de aforo aportada en: García Merino, C. Población y doblamiento en la Hispania romana: El Conventos Cluniaciensis. Valladolid, 1975.

⁴ Vid: Kuttruff, Room acoustics, Elsevier Applied Science, Londres, 1991.

Recuero López, M. Acústica arquitectónica, soluciones prácticas. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992.

⁵ Estos parámetros se encuentran más extensamente definidos en libros especializados. Nosotros hemos tomado las definiciones de Carrión Isbert, A. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1998. (Apéndice 2). Véanse también:

Cremer, L; Muller, H.A, Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science, Londres, 1982.

Barron M, Auditorium Acoustics and Architectural design, E & FN Spon, Londres, 1993.

⁶ Los resultados de la Definición D_{50} que aparecen en la figura4 vienen dados en tanto por ciento y, por tanto, multiplicados por cien.

⁷ Los resultados de la Eficiencia Lateral LF que aparecen en la figura5 vienen dados en tanto por ciento y, por tanto, multiplicados por cien.

⁸ Los resultados de RASTI que aparecen en las figura6 vienen en tanto por ciento y, por tanto, multiplicados por cien.