

Contribución al Estudio del Acondicionamiento Acústico de Aulas

Julio González Suárez
José Ignacio Sánchez Rivera
Dto. de Física Aplicada III

ETS de Arquitectura de Valladolid

I. INTRODUCCION

Uno de los objetivos que se deben contemplar a la hora de diseñar salas destinadas a la audición de la palabra como es el caso de teatros, salas de conferencias, aulas, etc, es el relativo a conseguir una buena audición y en general un ambiente acústico agradable [1]. Ello implica una atención especial tanto en el diseño como en la realización y acabado en el sentido de construir un conducto de comunicación propicio al uso a que se destine.

En lo relativo al aspecto geométrico se han ideado desde hace tiempo una serie de normas o reglas, concretamente para las salas prismáticas, que aún no se sabe con exactitud las premisas que conducían a los criterios que se han adoptado. Tal vez la razón fundamental habría que buscarla en la mera intuición del diseñador o en razones de tipo fenomenológico. Es el caso por ejemplo de Vitrubio, Palladio, Boltz, etc [2].

En el caso de salas destinadas a aulas para impartir docencia, es evidente la imperiosa necesidad de conseguir no solamente un campo sonoro homogéneo y exento de ruidos externos, sino que juega un papel primordial además la audibilidad de la palabra para que el oyente oiga y entienda [3]. Esto lleva consigo un estudio preciso, tanto desde el punto de vista urbanístico, en el sentido de elegir una ubicación adecuada del edi-

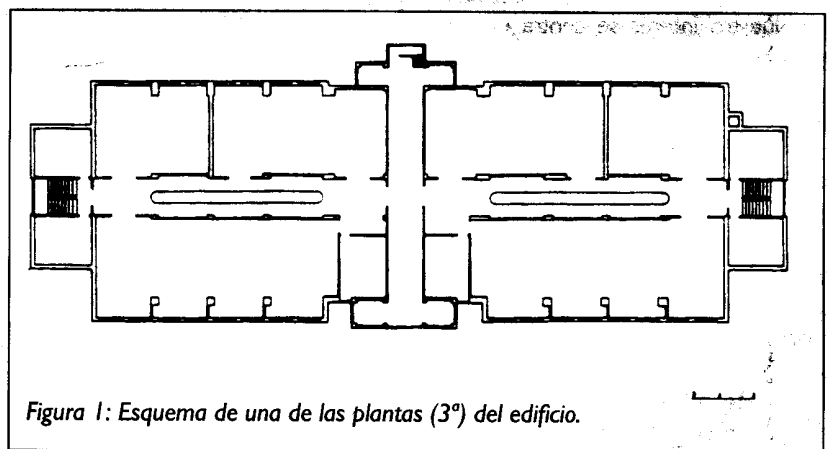


Figura 1: Esquema de una de las plantas (3ª) del edificio.

ficio, como del diseño y acabado del local, así como de los accesorios y mobiliario que se van a ubicar en la sala. En este sentido se han realizado numerosos estudios y tratados [1] y [4] en la línea de indicar las características geométricas y otros factores que influyen en la calidad acústica de una sala y de optimizar el aislamiento de los cerramientos [5] y [6].

En el trabajo que presentamos nos proponemos estudiar, de forma experimental, las características acústicas de algunas aulas del edificio que constituye la Escuela de Arquitectura de Valladolid y que data de los años setenta. Entendemos que son muchos los casos de aulas que se construyen de forma semejante a las que estudiamos en este artículo, tanto en lo que se refiere a su geometría, como a los aspectos meramente constructivos y en consecuencia las condiciones que obtengamos en este

estudio, serán aplicables también a las demás.

El objetivo que perseguimos es conocer las cualidades acústicas de estos recintos y, en el caso de que se detecte algún desequilibrio importante, proponer soluciones compatibles con la configuración proyectual, si es factible desde un punto de vista real. Para ello se han medido en distintos puntos de varios recintos, aulas y salón de actos, los niveles de sonido y tiempos de reverberación en sala vacía, así como el aislamiento de algunos cerramientos, todo ello para intervalos de frecuencias en tercios de octava.

El edificio consta de planta sótano, tres plantas y planta bajo cubierta. En la figura 1 exponemos el esquema de una de las plantas (3ª planta) que puede ser representativa del resto en cuanto a la distribución de espacios, aunque difieren en dimensiones por existir un pequeño voladizo de cada

planta respecto de la que precede en altura.

II. ESTRATEGIA DE MUESTREO PARA LA MEDIDA DE NIVELES Y TIEMPOS DE REVERBERACION.

Los medios experimentales utilizados para efectuar el muestreo son el equipo analizador acústico de edificios de la casa Bruel & Kjaer constituido por el analizador mod. 4418, fuente de sonidos mod. 4224 y el sistema de micrófonos correspondiente.

Nuestro interés se centra en los recintos del edificio dedicados a aulas y como caso aparte el Salón de Actos (S.A.). Las aulas se clasificaron en 5 grupos (I, II, III, IV y V) atendiendo a su geometría y a las características del mobiliario. Su tipología es prismática con algunas irregularidades debidas a los huecos (puertas y ventanas) y a la presencia de pilares. El muestreo se realizó en una de las aulas de cada uno de los grupos. La altura de los recintos es de 2,8 m y las dimensiones en planta, así como las superficies y volúmenes, las exponemos en la tabla I.

Considerando que las aulas son de tipo prismático, sus dimensiones nos proporcionan unos prismas unitarios cuyos puntos se alejan considerablemente de la zona que se pudiera considerar óptima según el criterio de espaciamiento de frecuencias de Boltz [7] e incluso respecto de cualquier otro criterio contemplado

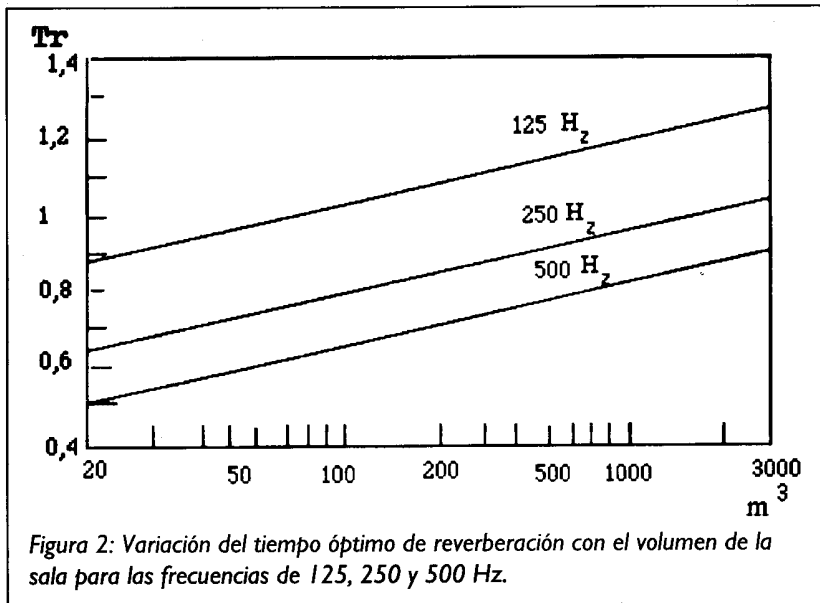


Figura 2: Variación del tiempo óptimo de reverberación con el volumen de la sala para las frecuencias de 125, 250 y 500 Hz.

en la bibliografía como adecuado para aulas.

Así mismo para comparar los valores de los tiempos de reverberación que obtenemos en la medida, con los considerados como óptimos, en la figura 2 representamos los tiempos de reverberación óptimos (T_{op}) para el caso de las frecuencias 125, 250 y 500 Hz en función del volumen de la sala [4].

III. METODOLOGIA DE MEDIDAS Y RESULTADOS

Con la fuente de sonidos en la posición que se supone ocupa el profesor, sobre la tarima, y el micrófono a una cota de 1,2 m respecto del

suelo del aula, que es aproximadamente la altura del oído de una persona media sentada, se midieron los niveles sonoros y tiempos de reverberación para intervalos de frecuencia en tercios de octava, en varios puntos de cada aula. La medida fue repetida para cada punto tres veces y los valores que se representan son los valores medios. Para el caso de los tiempos de reverberación también se obtuvo la media de los valores medidos en todos los puntos del local.

Dado que las medidas se realizaron cuando no había clases, el ruido de fondo se mantenía sistemáticamente por debajo de los 50 dB, para todos los intervalos de frecuencia, que no es significativo respecto a los aportados por la fuente de sonidos y por tanto no fue tomado en consideración a la hora de desarrollar el análisis.

Valores obtenidos.

Aulas tipo I

Las aulas denominadas como de tipo I, son de tamaño reducido según se deduce de la tabla I, y por tanto el tiempo óptimo de reverberación atendiendo a la gráfica de la figura 2 para el volumen del aula que se trata, nos da para la frecuencia de 500 Hz un valor de 0,68 s. Se realizó la me-

TIPOS DE AULAS						
	I	II	III	IV	V	S.A.
LARGO (m)	10	15,5	15,5	21	21	25,8
ANCHO (m)	7,5	7,5	7,5	7,5	8,5	7,5
Superficie m ²	76	116	116	153	178	193
Volumen m ³	212	325	325	429	500	542

Tabla I: Dimensiones de las plantas de las aulas y valores de las superficies y volúmenes.

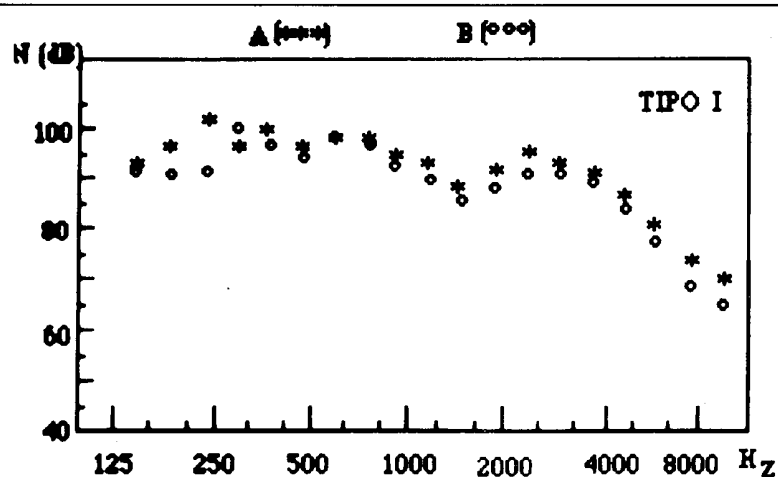


Figura 3-a: Representación gráfica de los valores de niveles medidos en los puntos A y B.

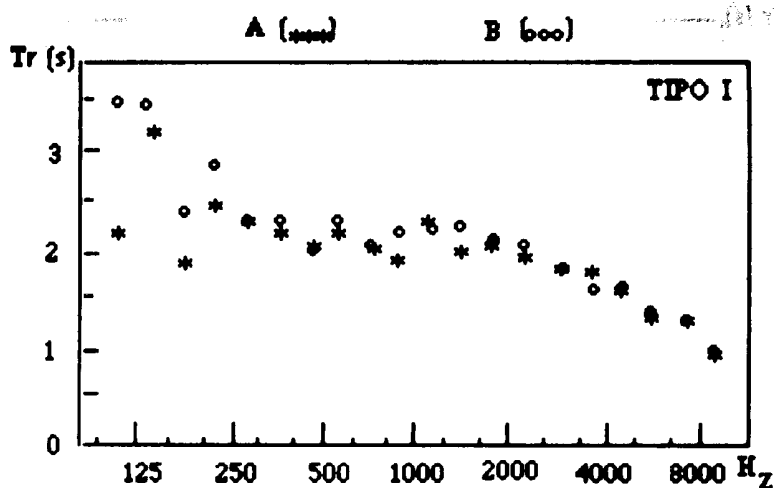


Figura 3-b: Representación gráfica de los valores de tiempos de reverberación medidos en los puntos A y B.

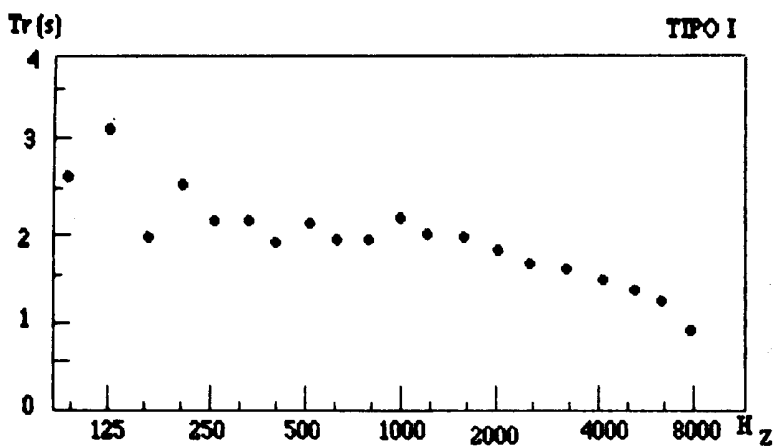


Figura 3-c: Valores medios del Tr medidos en los puntos A y B.

dida en dos puntos, uno en las proximidades de la fuente, a la cabecera del aula, punto A, y otro en la parte trasera del aula, punto B.

En las gráficas (a) y (b) de la figura 3 representamos los valores de los niveles (N) y tiempos de reverberación (T_r) medidos en estos puntos. Con el ánimo de dar un valor global del tiempo de reverberación, en la gráfica (c), de la misma figura, representamos el valor medio de los T_r medidos en los dos puntos.

A partir de las gráficas correspondientes a los niveles de sonido se puede detectar que su variación con la frecuencia es distinta en los dos puntos, lo que indica poca homogeneidad del campo y además unas variaciones sustanciales para las distintas frecuencias, lo que pone de manifiesto el predominio de unos modos de vibración.

En el caso de los tiempos de reverberación observamos que son muy altos para todo el rango de frecuencias, especialmente para las bajas, y que existe mucha variación a lo largo del espectro. Para la frecuencia de 500 Hz la diferencia entre el valor medio del tiempo de reverberación y el óptimo es $(T_r - T_{op})_{500} = 1,41$ s. Con estas características del campo sonoro, la audibilidad es bastante deficiente en general, extremo que se constata por la opinión generalizada del alumnado.

Aulas tipo II

Las dimensiones de la planta de estas aulas son superiores a las del tipo I y para tratar de analizar con más precisión la difusividad del campo sonoro, se realizaron medidas en tres puntos situados a lo largo del eje longitudinal de la sala. El punto A cercano a la tarima, el B hacia el centro del aula y el F al final. En las gráficas de la figura 4-a y 4-b respectivamente exponemos los valores obtenidos para los niveles y tiempos de reverberación en los tres puntos y en la gráfica 4-c el valor medio de los tiempos de reverberación.

Puede observarse que su comportamiento es dispar y que en todos los casos existen unas frecuencias para las que los niveles son muy diferentes

a los de otras frecuencias. Ello pone de manifiesto, al igual que en el caso anterior, que el campo no se aproxima mucho a un campo homogéneo y que no existe uniformidad en la distribución de los modos de vibración, como era lógico esperar dada la geometría del recinto.

El T_{op} es en este caso 0,72 s. aproximadamente y la diferencia entre el valor medio de los tiempos de reverberación obtenidos en los tres puntos de medida con el óptimo, para la frecuencia de 500 Hz, es $(T_r - T_{op})/500 = 1,28$ lo que supone una desviación importante y por tanto, una calidad auditiva muy deficiente.

Aula Tipo III

Las aulas de tipo III tienen unas dimensiones semejantes a las del tipo II pero las mesas y asientos son de materiales distintos y diferente formato. El mobiliario para el caso II, son pupitres independientes de aglomerado de madera cubiertos en la parte superior con chapa de formica. Sin embargo en las aulas de tipo III las mesas son enteras según las filas y están compuestas con aglomerado de madera chapeadas con una material menos reflectante que el anterior y los asientos son de plástico inyectado en molde. La medida se realizó también en tres puntos, con el mismo criterio que en el caso del aula tipo II. A pesar de que el mobiliario es distinto, no se detecta sin embargo, una diferencia apreciable en cuanto a los niveles de sonidos según se observa en la gráfica de la figura 5-a donde se representan los valores de los niveles para dos puntos de ubicación similar en ambas aulas, punto B.

Esto nos indica que el condicionante fundamental para la distribución de la energía sonora, es la geometría de la sala. Por tanto las observaciones realizadas para el caso de las aulas tipo II son aplicables también para este caso.

En cuanto a los tiempos de reverberación se aprecian algunas diferencias respecto al caso anterior, siendo más acusadas en la zona de bajas frecuencias, según se pone de manifiesto en la gráfica de la figura

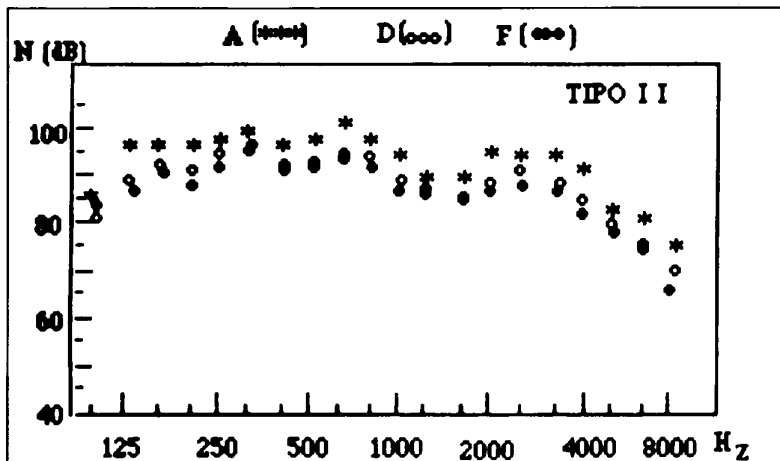


Figura 4-a: Variación de los valores de los niveles medidos en los puntos A, B y F.

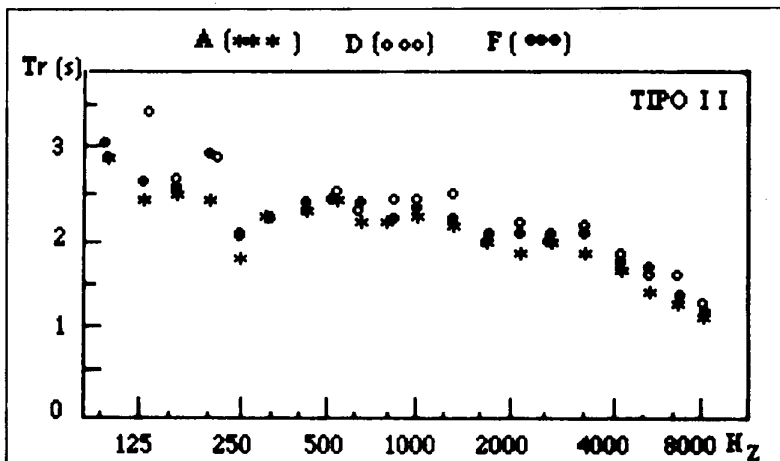


Figura 4-b: Tiempos de reverberación medidos en los puntos A, B y F.

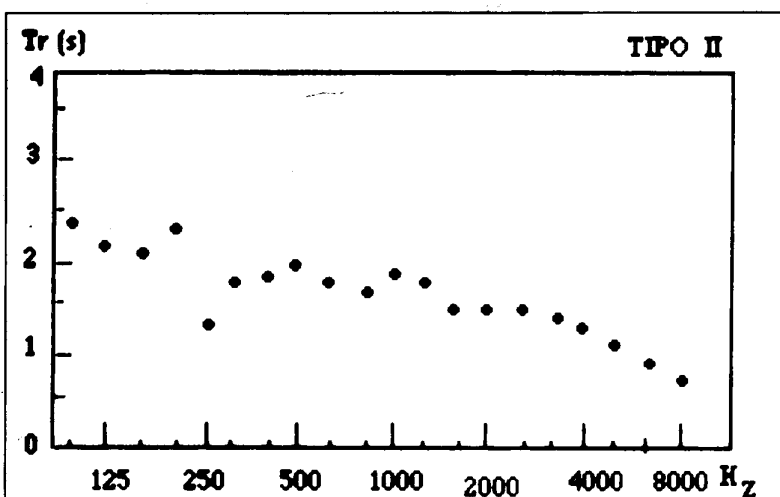


Figura 4-c: Variación con la frecuencia del valor medio del Tr medido en los puntos A, B y C.

5-b, donde se representan los valores obtenidos en el punto B de las dos aulas. Para este caso $(T_r-T_{op})_{500} = 1,29$ s. Aunque el comportamiento es algo distinto al caso anterior, es aplicable sin embargo lo reseñado en cuanto a sus características acústicas.

Aulas tipo IV y V

En este apartado incluimos los casos de las aulas tipo IV y V conjuntamente por tener un comportamiento, desde el punto de vista acústico, muy similar aunque las dimensiones no sean exactamente iguales. Las mesas de estas aulas, llamadas gráficas, son individuales y tie-

nen estructura metálica con tableros de dibujo con chapeado melamínico.

En estos dos casos se realizó la medida en seis puntos repartidos por la superficie. Los puntos A y B en la primera fila de mesas, a igual distancia del eje longitudinal y separados de las paredes laterales unos dos metros. Los puntos C y D en la fila intermedia con las mismas distancias respecto de los que en el caso anterior y los puntos E y F en la última fila separados de igual forma que los anteriores. En la figura 6 se exponen los valores obtenidos para los niveles (figura 6-a) y para los tiempos de reverberación (figura 6-b) medidos en las dos aulas en puntos de similar ubicación, punto B, dentro de las mismas.

Con carácter general se detecta un comportamiento bastante diferente respecto de las otras aulas en cuanto a la homogeneidad del campo, sobre todo para frecuencias graves y medias. No existe una diferencia tan acusada entre los valores medidos en los distintos puntos tanto para los niveles como para los tiempos de reverberación, que da idea de una mayor difusión del campo, y estos mismos valores no difieren mucho para las distintas frecuencias, lo que origina una audibilidad más ajustada. Los T_r se mantienen con cierta uniformidad en torno a los 2,5 s. para el rango de frecuencias (100, 1000 Hz) y decayendo progresivamente para frecuencias mayores. En este caso las diferencias entre los tiempos de reverberación medios y los óptimos son $(T_r-T_{op})_{500} = 1,55$ s para el caso IV y $(T_r-T_{op})_{500} = 1,53$ s para el caso V.

Salón de Actos (S.A.)

Como caso diferente de los tratados hasta el momento, se ha estudiado el recinto dedicado a Salón de Actos (S.A.). Las particularidades principales son sus dimensiones, el tipo de asientos, que en este caso son de base acolchada, y la presencia de cortinaje.

La medida de los niveles se efectuó en los puntos A, D, G distribuidos a lo largo del eje longitudinal del local y el tiempo de reverberación, en estos mismos puntos y en otros dos C y E según el eje transversal.

En las gráficas de la figura 7 representamos los valores de los niveles obtenidos en estos puntos, apreciándose un comportamiento bastante irregular respecto de las frecuencias y muy diferente entre los puntos A y G, aunque bastante deficiente en ambos casos, en el sentido de que el campo acústico no es homogéneo. Así por ejemplo los valores para las distintas frecuencias en el punto A oscilan entre 102 dB para el tercio de frecuencias centrado en 630 Hz y 71,8 para la banda centrada en 8000 Hz. Esto nos da idea de la existencia de modos de vibración muy acusados para algunas frecuencias lo que comporta una distorsión im-

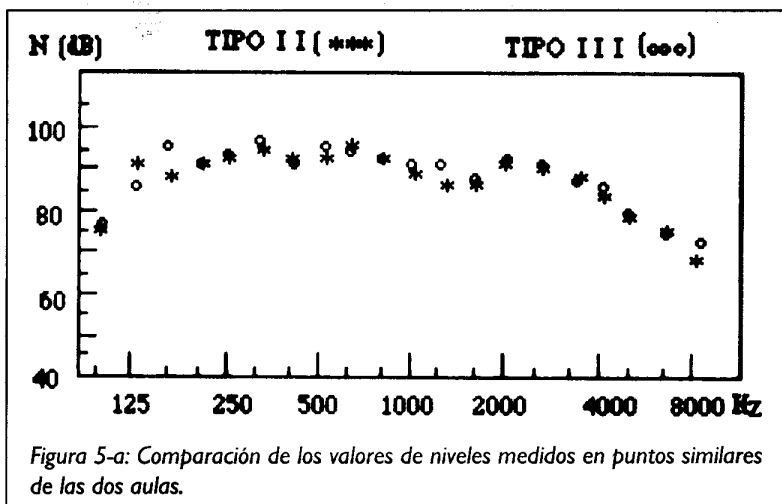
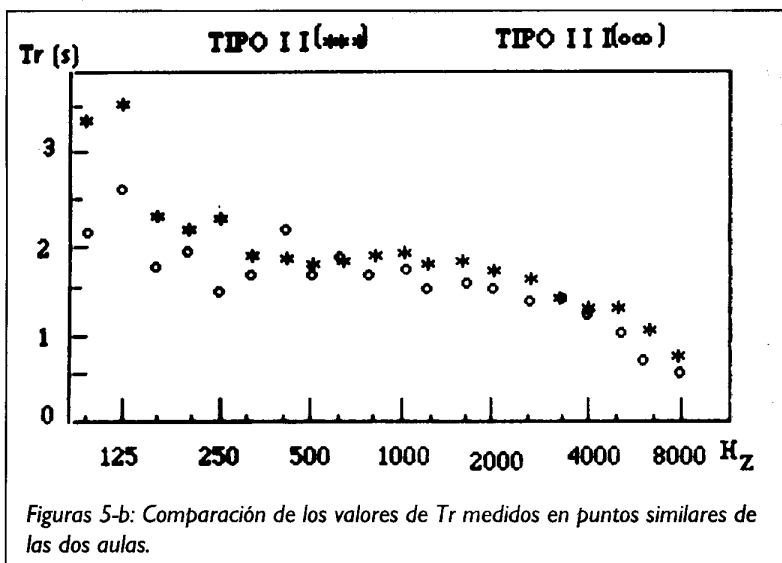


Figura 5-a: Comparación de los valores de niveles medidos en puntos similares de las dos aulas.



Figuras 5-b: Comparación de los valores de T_r medidos en puntos similares de las dos aulas.

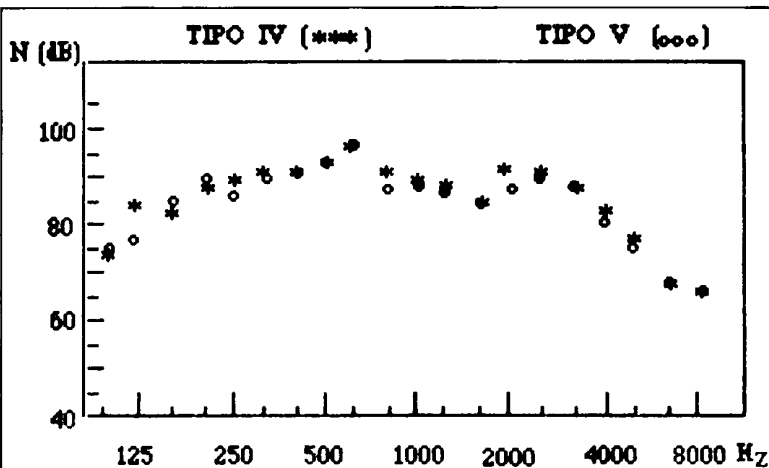


Figura 6-a: Variación con la frecuencia de los niveles medidos en las dos aulas en un punto de ubicación similar.

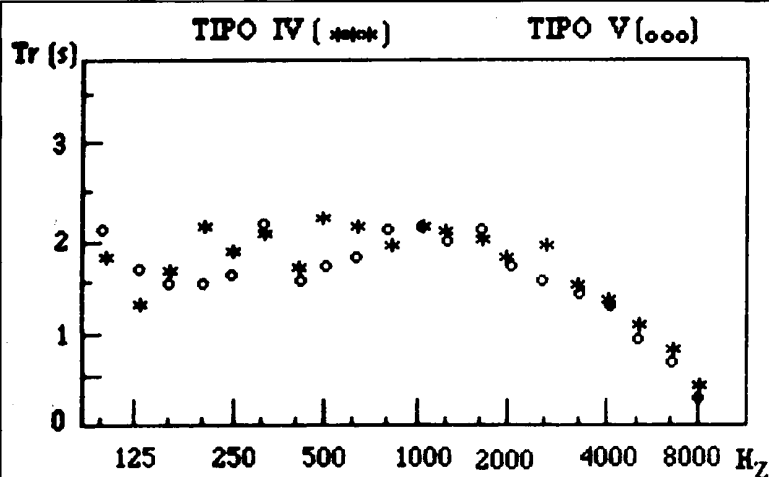


Figura 6-b: Variación con la frecuencia de los Tr medidos en las dos aulas en un punto de ubicación similar.

portante en el normal oír y entender de las personas.

En la gráfica 8-a representamos los valores del tiempo de reverberación obtenidos en los puntos A, D, G y en la 8-b los obtenidos en los puntos E, D y C. En la gráfica 8-c exponemos el valor medio de los obtenidos para el tiempo de reverberación en todos los puntos. Se observa un comportamiento bastante similar en todos los puntos destacando la escasa oscilación que existe para las distintas frecuencias, sobre todo a partir de la frecuencia de 200 Hz decayendo suavemente desde el valor 1,5 s. hasta 0,35 s. para 8000 Hz de forma paulatina. El valor $(T_r - T_{op})_{500} = 0,47$ s no es muy elevado y de todo

ello se deduce que existe una mejor claridad y entendimiento del mensaje oral aunque con una distribución de la energía sonora muy irregular.

IV- AISLAMIENTO ACUSTICO DE ALGUNOS CERRAMIENTOS

Cuando se aborda la ejecución de una obra según el proyecto correspondiente, entendemos se debe acomodar a lo estipulado en la NBE-CA en lo concierne a las características acústicas. Uno de los apartados que se contempla, es el relativo al aislamiento acústico de los cerramientos en el que se especifica que realizada la obra atendiendo a las recomendaciones que se formulan en la Norma, se conseguirá un determinado aislamiento. Tales recomendaciones se fundamentan en lo previsto por la ley de masas o a partir de datos empíricos, según ensayos en laboratorios especializados o en unas situaciones de muestreo determinadas.

Sin embargo, cuando un cerramiento forma parte de un edificio, sus condiciones de aislamiento pueden ser bastante distintas de las previstas. Por ello es importante conocer el aislamiento de cerramientos, que podríamos considerar como usuales en ciertas construcciones, con el ánimo de aportar datos que puedan ser útiles para el profesional, a la hora de prever cuál será el aislamiento

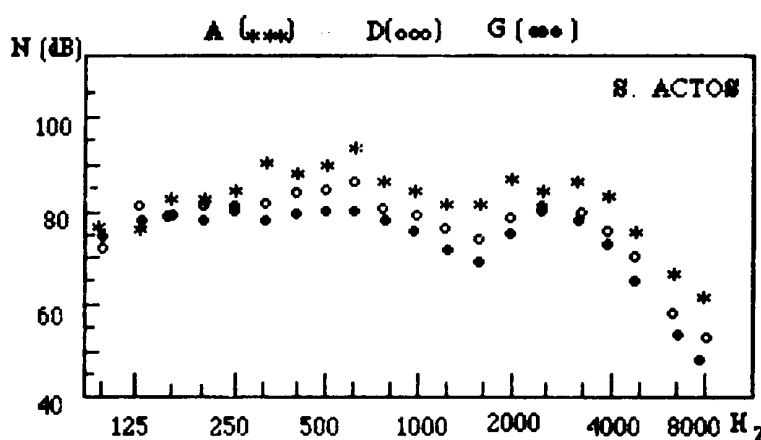


Figura 7: Variación con la frecuencia de los niveles medidos en tres puntos según un eje longitudinal.

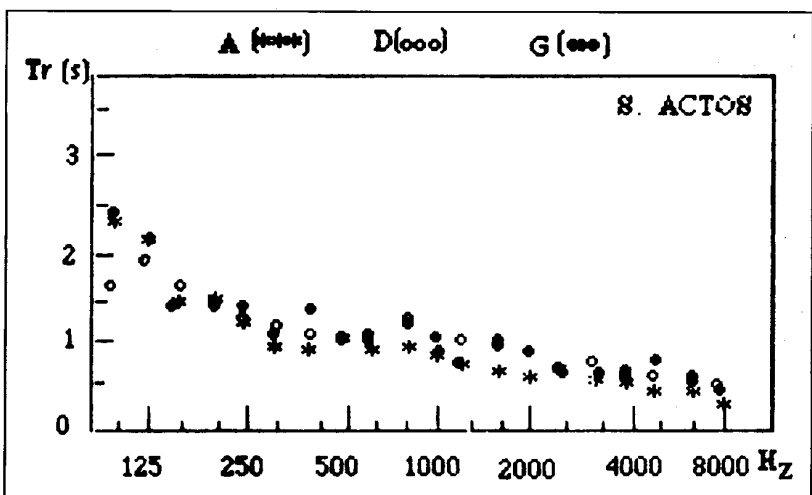


Figura 8-a: Variación con la frecuencia de los Tr medidos en tres puntos según el eje longitudinal.

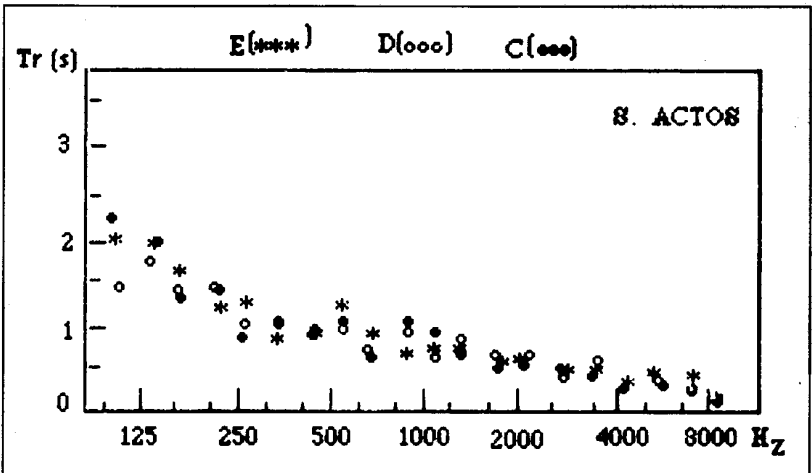


Figura 8-b: Variación con la frecuencia de los Tr medidos en tres puntos según el eje transversal.

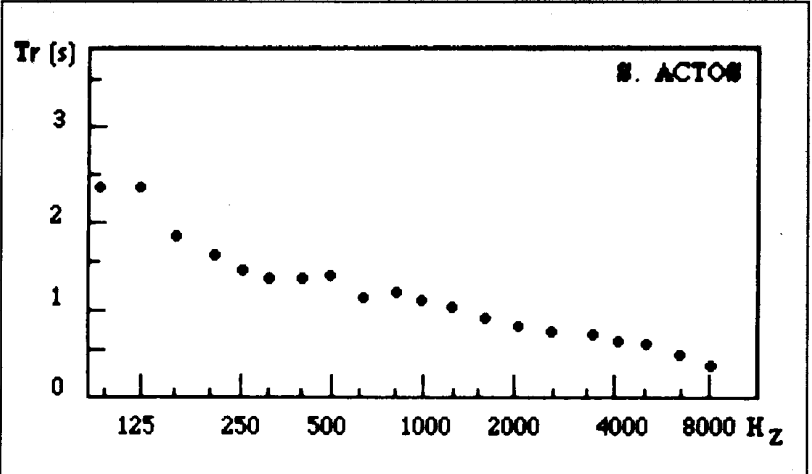


Figura 8-c: Variación con la frecuencia del valor medio del Tr medido en todos los puntos.

acústico real del cerramiento. Por otra parte nos parece que también es de interés comparar los valores de aislamiento reales con los que se obtienen a partir de la ley de masas.

En este sentido se midió el aislamiento estandarizado o normalizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s. en la sala receptora, de dos cerramientos de un aula tipo I. Uno de los cerramientos es el de separación con el pasillo y el otro con un aula tipo III.

Cerramiento que separa aula tipo I del pasillo

El cerramiento que separa un aula tipo I con el pasillo tiene una superficie total de 28 m² y está compuesto por un tabique de superficie 22,4 m² constituido por tabicón de ladrillo hueco doble y revestido con yeso por ambas caras con un espesor de aproximadamente 1,5 cm. Este cerramiento lleva incorporada una puerta de 5,6 m² conformada con tableros de contrachapado montados sobre bastidores.

Para realizar la medida del aislamiento se efectuaron dos ensayos: uno que podríamos considerar como el correspondiente al aislamiento de la puerta y se obtuvo colocando la fuente y los micrófonos frente a ella, y el otro, que consideramos se corresponde con el aislamiento global del cerramiento, se obtuvo poniendo la fuente y los micrófonos en puntos alejados de la puerta. Los valores respectivos se representan en las gráficas de la figura 9. El aislamiento global en dB(A) para este cerramiento obtenido a partir de los datos experimentales es de 32,7 dB(A).

Cerramiento que separa aula tipo I de un aula tipo III

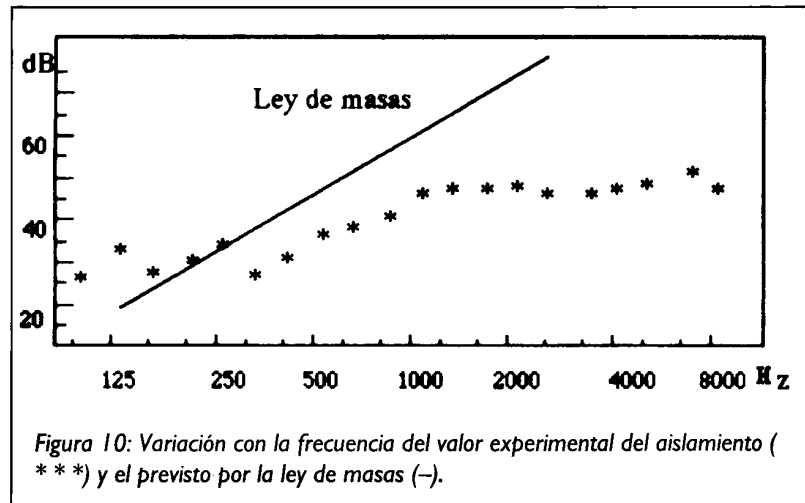
El cerramiento con el aula contigua está constituido por dos tabiques de ladrillo tabicón (9 cm.) separados por una cámara de 4 cm. que contiene según inspección visual corcho inyectado (borra de corcho). Las caras exteriores de los tabiques que forman el cerramiento, están re-

vestidas de yeso con una capa de espesor comprendido entre 1,5 y 3 cm, dando un valor promedio aproximado de 2,5 cm. La masa por unidad de superficie del cerramiento es entonces de $260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ y el aislamiento previsto en la NBE-CA para este tipo de cerramientos es superior a 46 dB(A) .

En la gráfica de la figura 10 se exponen los valores de aislamiento estandarizado del cerramiento medidos para frecuencias en tercios de octava, lo que supone un aislamiento global según NBE-CA de 41.4 dB(A) . Una conclusión inmediata que se detecta, a partir de estos datos, es que existe una diferencia sustancial entre el valor del aislamiento "exigible" (45 dB(A)), según la NBE-CA para cerramientos separadores de aulas docentes y el medido experimentalmente.

Comparación con la ley de masas.

La ley de masas que nos relaciona el aislamiento en dB de un cerramiento de masa M en $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en función de la frecuencia viene dada por la expresión $R=20 \text{ Log}(f) + k$. El valor de k se obtiene a partir de unas tablas o curvas [4] que nos relacionan, para las distintas frecuencias, el aislamiento con la masa del cerramiento en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Para el caso del cerramiento que tratamos ob-



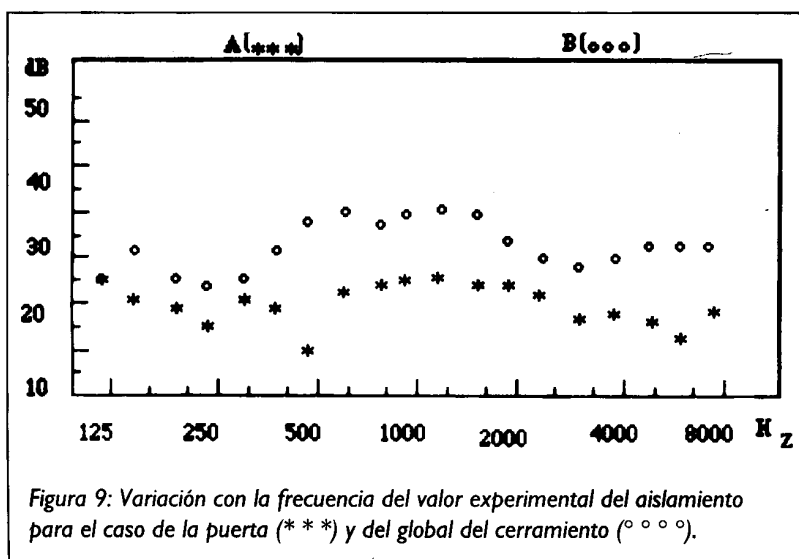
tenemos para k el valor de -12 . En la figura 10 representamos, además de la gráfica correspondiente a los valores de aislamiento medidos, la que se obtendría a partir de la ley de masas.

Como fácilmente puede apreciarse, las discrepancias entre lo que predice la ley de masas y los valores medidos son bastante significativas. Estas discrepancias pueden ser debidas a muchas causas. En el supuesto de que el cerramiento se haya construido conforme a como se recomienda en la Norma Básica de Edificación, en lo que se refiere al aislamiento acústico y por tanto la vía de transmisión directa, es decir a través del cerramiento sea la adecuada, el defecto se deberá a las transmisiones indirectas por la existencia

de puentes acústicos o la falta de estanqueidad en el recinto emisor o por las partes "débiles". Ello nos lleva a cuestionar la oportunidad de construir unos cerramientos con mucha masa o muy sofisticados, mientras no se garanticen unas conexiones constructivas y un acabado adecuados y se corrijan los puntos débiles en cuanto al aislamiento acústico.

CONCLUSIONES

A modo de conclusión podemos establecer que las condiciones acústicas de los recintos dedicados a aulas en el edificio son bastante deficientes, tanto en lo que se refiere a la homogeneidad del campo acústico como a la reverberación y al aislamiento. Para evitar estos inconvenientes se debería tener en cuenta en el proyecto que unas geometrías tipo prismático, sobre todo para bajas frecuencias, tienden a "concentrar" la energía sonora en algunos puntos en perjuicio de otros y por tanto el campo sonoro es bastante "irregular". Si la concepción proyectual viniera condicionada por otros factores y no se pudiera atender con el debido rigor el aspecto acústico, aun siendo los recintos de concepción prismática, se podría mejorar considerablemente el campo incorporando unas superficies que desviarán las reflexiones hacia los puntos "sordos" y distribuyeran más los modos de vibración.



Por otra parte, las superficies que constituyen la "piel" de los recintos son poco absorbentes, originándose una reverberación excesiva y por ello una audibilidad de la palabra bastante

deficiente, que unido al bajo aislamiento de los cerramientos y por tanto a la existencia de ruido de fondo significativo, los oyentes aunque oigan no entienden. Por tanto,

entendemos que una mayor atención del proyectista hacia estos temas, contribuiría notablemente a mejorar la calidad del habitat, sin que ello suponga un costo adicional importante.

BIBLIOGRAFIA

1 Cresson

La Qualité Sonore des Espaces Habités
Colloque International; Grenoble 1991.

2 Daumal, F.

"Comentarios acústicos a las reglas de oro de los tratadistas arquitectónicos"
Revista de Acústica, XVII (1 y 2), 13-19, (1986).

3 Plagnol, R.

"Résultats de mesures acoustiques dans des salles de classe"
Cahiers du C. Sc. et T. du Batiment, 73 (620), (1965).

4 Josse, R.

La acústica en la construcción.
G. Gili, Barcelona (1975).

5 Craik, R. et al.

"The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part I airborne sound".
Applied Acoustics, 27, 57-63, (1989).

6 Makris, S. et al.

"Transmission loss optimization in acoustics sandwich panels"
J. Acoust Soc. Am., 79 (6), 1833-1843 (1986).

7 Pérez Miñana J.

Compendio práctico de Acústica aplicada.
Edit. Labor, S.A.; Barcelona 1969.