

CARACTERIZACIÓN SONORA DE AULAS. UN ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS ACÚSTICOS EN AULAS ARGENTINAS

REFERENCIA PACS: 43.55.Gx

Antonio Méndez (*), Alberto Stornini (*), Liberto Ercoli (**) y Adrián Azzurro(**)
(*) Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas, Pcia. Bs. Aires.

Parque Tecnológico Gonnet, 13 y 506
1897 La Plata, ARGENTINA.

E-mail: ciclal@gba.gov.ar

(**) Grupo Análisis de Sistemas Mecánicos, Facultad Regional Bahía Blanca
Universidad Tecnológica Nacional

C/.11 de abril 461

8000 Bahía Blanca, ARGENTINA.

E-mail: lercoli@criba.edu.ar

ABSTRACT

Numerous recent investigations have demonstrated that the acoustical environment in a classroom is an important variable contributing to the academic and psychological achievement of the students. Excessive ambient noise and reverberation in classrooms are serious obstacles to the learning experience because they typically interfere with speech recognition. This study reports on the acoustical qualities and architectural features of typical classrooms in Argentina. It is shown that, in the case of the classrooms belonging to a high school and an university studied, the investigated acoustical parameters are well upon those recommended by international criteria and guidelines. Theoretical computations are presented in order to suggest some practical architectural solutions from the acoustical point of view.

REVERBERACIÓN Y ABSORCIÓN

Desde el punto de vista de la buena acústica, un salón de clases debería poseer un TR del orden de 0,5 segundos. De no ser así, a medida que TR supera este valor, comienza a notarse una falta de inteligibilidad del mensaje oral, trayendo en consecuencia una mala interpretación de los conceptos que el profesor explica en la clase o conferencia.

El ruido de fondo generalmente se debe a ruidos provenientes de otros sectores del establecimiento docente, del ruido de tránsito que llega desde las calles vecinas, etc.

Es evidente que, cuando el Ruido de Fondo (RF) supera un cierto valor (45 a 50 dB), nuevamente la comprensión de un mensaje se torna difícil, ya que las palabras del profesor pueden ser interferidas por los ruidos que arriban desde el exterior.

Entonces RF, junto a TR, son los factores que determinan la calidad acústica de las salas que serán destinadas a la problemática de la enseñanza y el aprendizaje.

El factor fundamental que afecta la comunicación en las aulas es la inteligibilidad, que se define como el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente. Se aconseja que el índice de inteligibilidad sea superior al 80%.

La inteligibilidad está relacionada con TR y con RF. Para mejorar la inteligibilidad se deberán acortar los TR y aumentar la relación señal-ruido dentro del aula.



Las mediciones oportunamente realizadas mostraron que tanto el TR como el RF tienen valores inadecuados.

Cabe consignar que los TR se miden en bandas de tercios de octava, entre 100 y 5000 Hz, pero los cálculos se limitan a las 6 bandas de octavas entre 125 y 4000 Hz, que son aquellas donde fundamentalmente se realiza la comunicación hablada. Además, las tablas de absorción de materiales que figuran en las referencias [1] y [2], están dadas en esa forma.

Cuando se utilicen datos de los materiales medidos en nuestro Laboratorio, que fueron medidos siempre por tercios de octava, entre 100 y 5000 Hz, se usarán solamente los valores correspondientes a las octavas comprendidas entre 125 y 4000 Hz.

CÁLCULOS TEÓRICOS

Para conocer los TR óptimos en cada caso se consultó a Parkin [3], Yacoel [1] y Knudsen [4]. Ellos muestran gráficos de los TR recomendados para difusión de palabra, en función del volumen de la sala, los que convertidos a forma analítica resultan en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{TR} &= 0,29 + 0,17 * \log V \quad (\text{Parkin}) \\ \text{TR} &= 0,27 + 0,18 * \log V \quad (\text{Yacoel}) \\ \text{TR} &= 0,28 + 0,19 * \log V \quad (\text{Knudsen}) \end{aligned}$$

Si V se expresa en m³, TR resulta en segundos.

En este trabajo, para las aulas, se adoptó una fórmula con coeficientes promedio:

$$\text{TR} = 0,28 + 0,18 * \log V$$

Aplicando esta fórmula se calcularon los TR óptimos para todas las aulas, solamente en las 6 bandas de octava elegidas anteriormente.

Estos valores son para frecuencias de 500 Hz o superiores; para frecuencias bajas se los deberán afectar de un factor dado por Brüel [5] y otros autores. Este factor se adoptó, como promedio, en 1,16 para 250 Hz y en 1,46 para 125 Hz, que son las bandas de octavas de más baja frecuencia donde se efectuará el cálculo.

Según Richardson [6], los TR finales pueden considerarse aceptables cuando se encuentren dentro de una banda de $\pm 10\%$ del valor óptimo.

Para evaluar el tratamiento acústico necesario, que lleve los TR medidos a aproximarse a los valores óptimos, se empleó la fórmula de Eyring, que expresa TR en función de la absorción total, el volumen y la superficie del local.

Cuando se debe adecuar un local para llevarlo a las condiciones acústicas óptimas, se debe conocer su tiempo de reverberación original, su volumen, superficie interna total (SL), y el uso a que estará destinado (música o palabra). Los pasos a seguir son:

- 1) Calcular los TR óptimos para cada frecuencia, dado el volumen y destino.
- 2) Medir el tiempo de reverberación de la sala vacía, por octavas, entre 125 y 4000 Hz.
- 3) Calcular TR considerando una determinada ocupación.
- 4) Agregar absorbentes adecuados para ajustar TR en cada octava.

Debe tenerse en cuenta que las personas y el mobiliario ocupantes de la sala presentan una cierta absorción al sonido, que deberá tenerse en cuenta antes de iniciar el tratamiento con materiales absorbentes.



Hay varias fórmulas clásicas para calcular TR a partir de la absorción de un local, pero habitualmente se usa la de Eyring:

$$TR = \frac{0,16 V}{-SL \cdot \ln(1 - \alpha)}$$

Donde: TR = Tiempo de reverberación (s).
V = Volumen del local (m³).
SL = Superficie interna de la sala (m²).
 α = Coeficiente de absorción promedio.

Para sala vacía, puede calcularse el coeficiente de absorción promedio, α_v , despejándolo de la fórmula de Eyring:

$$\alpha_v = 1 - e^{-0,16 V / TR_v SL}$$

La absorción agregada (**Aa**) por **n** personas que ocupen la sala será:

$$Aa = n \cdot Ap \text{ (Sabines)}$$

Se debe calcular esta absorción con diferentes valores de **n** que representen distintos porcentajes de la capacidad de la sala.

El nuevo valor de α promedio, α_p , a sala ocupada, será:

$$\alpha_p = \alpha_v + Aa / SL$$

Agregando ahora un cierto material absorbente, del que debemos conocer su coeficiente de absorción α_{m1} , en cada banda de octava, en Sabines/m², y la cantidad colocada, **S1**, en m², el coeficiente de absorción del local aumentará a:

$$\alpha_f = \alpha_v + Aa / SL + \alpha_{m1} S1 / SL$$

Aplicando nuevamente la fórmula de Eyring puede calcularse el TR final resultante del agregado del material absorbente, que surge en función de la absorción final **A_{f1}**.

$$TR_{f1} = 0,16 V / A_{f1} \quad \text{Donde: } A_{f1} = -SL \cdot \ln(1 - \alpha_{f1})$$

Este procedimiento debe repetirse para las 6 bandas de octava y pueden emplearse números **n** de personas. Surgirán los TR en cada condición, que deberán compararse con los óptimos ya calculados. También puede intentarse con diferentes cantidades de material absorbente.

Se acostumbra calcular la absorción para un determinado porcentaje de ocupación de la sala. En nuestro caso se adoptó un 50 %, dado el carácter de los cursos. Si la ocupación llegara a 100 %, los TR bajarían moderadamente, sin que esto afecte a la buena acústica del local y a la consiguiente inteligibilidad del mensaje.

Suponiendo que el uso de un solo material no permita llegar al valor óptimo y deba agregarse otro, de absorción α_{m2} , en cantidad **S2**, deberá calcularse nuevamente el coeficiente de absorción final y el consiguiente TR definitivo.

Para un manejo más ágil de los datos, que logre una aproximación sucesiva a los valores de TR necesarios, se usó una hoja de cálculo electrónica que incluye las fórmulas vistas.



MEDICIONES REALIZADAS

Aula pequeña, en un instituto de enseñanza, con piso de listones de madera, cielorraso de yeso sobre losa. La característica principal es que tiene dos paredes conformadas por mamparas de vidrio.

	125	250	500	1000	2000	4000
TR medido (s)	1.88	1.57	1.61	1.51	1.51	1.53
TR óptimo (s)	0.61 a 0.75	0.50 a 0.61	0.43 a 0.53	0.43 a 0.53	0.43 a 0.53	0.43 a 0.53

Se efectuó un tratamiento con 6 m² de cortina liviana, plegada al 50 %, cubriendo parte de la mampara vidriada, con lo que resultan los siguientes tiempos de reverberación:

	125	250	500	1000	2000	4000
TR final (s)	1.03	0.65	0.54	0.41	0.43	0.46

Aula mediana, en una universidad, con piso de mosaicos calcáreos, cielorraso de yeso sobre losa y gran ventanal.

Aquí se midieron los TR del aula sin tratamiento, luego se construyó un cielorraso de placas de poliestireno expandido, a 30 cm del cielorraso original, cubriendo todo el techo (55,4 m²); se volvieron a medir los TR, pero con este procedimiento no se alcanzaron los valores óptimos

	125	250	500	1000	2000	4000
TR1 medido (s)	4.52	3.76	2.48	2.30	2.08	1.59
TR2 medido (s)	3.58	1.85	1.37	1.52	1.58	1.31
TR óptimo (s)	0.83 a 1.01	0.68 a 0.83	0.59 a 0.72	0.59 a 0.72	0.59 a 0.72	0.59 a 0.72

El ajuste final se realizó mediante el agregado de otros absorbentes. Se calculó un tratamiento con 25 m² de aglomerado de 6 mm sobre 50 mm de lana de vidrio, mas 16 m² de placas de espuma de poliéster, onduladas, de 75 mm de espesor, con lo que resultan los siguientes tiempos de reverberación:

	125	250	500	1000	2000	4000
TR final (s)	0.94	0.66	0.72	0.71	0.69	0.63

Aula grande, en una universidad, con piso de mosaicos calcáreos, cielorraso de yeso sobre losa y grandes superficies vidriadas.

	125	250	500	1000	2000	4000
TR medido (s)	3.13	4.06	3.76	3.86	2.86	2.30
TR óptimo (s)	0.98 a 1.20	0.79 a 0.97	0.68 a 0.84	0.68 a 0.84	0.68 a 0.84	0.68 a 0.84



Se efectuó un tratamiento con 48 m² de paneles de madera aglomerada, de 3 mm de espesor, perforados, con lana de vidrio de 50 mm y espacio de 35 mm detrás, con lo que resultan los siguientes tiempos de reverberación:

	125	250	500	1000	2000	4000
TR final (s)	0.94	0.72	0.63	0.60	0.56	0.64

ESTUDIO DEL AISLAMIENTO EN LAS AULAS

Las aberturas, llámense puertas o ventanas, son puntos débiles para la intromisión directa del ruido exterior. La debilidad es debida a la masa relativamente baja de los vidrios, bastidores de ventanas y puertas, comparándola con la de los muros tradicionales de ladrillos. Un aumento de la masa de vidrios, marcos y hojas genera una mejora de aislamiento. El aislamiento de la fachada está condicionado además por la superficie de la abertura.

La calidad acústica de una fachada, en síntesis, estará dada por sus elementos constitutivos, o sea el muro y las aberturas que la conformen. Las dos formas más sencillas y eficaces de evaluar la calidad acústica de una fachada son:

- * A través del índice R_w , que expresa el aislamiento a los ruidos que posee la fachada. Depende de los materiales usados y tecnología constructiva.
- * Mediante el número único NR, que indica el nivel sonoro percibido por las personas, o sea la sensación sonora, también llamada sonoridad. Depende del aislamiento de la fachada y del nivel de ruido externo.

Para ambos cálculos se necesita conocer previamente el "Índice de Reducción Sonora" (R), definido en la Norma ISO 140 [7] y que se expresa en forma de tabla y/o gráfico, en decibeles, en función de la frecuencia.

Una forma más cómoda de manejar los datos de aislamiento es a través del "Índice de Reducción Sonora Compensado" (R_w), el cual se obtiene usando perfiles deslizantes, siguiendo el procedimiento de la Norma ISO 717 [8].

Este método, empleando un número único, permite justipreciar fácilmente el aislamiento acústico de un elemento de construcción. Este número tiene en cuenta los valores de aislamiento en distintas frecuencias, con lo cual se logra evaluar el comportamiento global de la fachada (paredes, ventanas, elementos de ventilación, etc.).

Además el R_w permite una fácil comparación de materiales diversos, lo que facilita valuar rápidamente una muestra, aún a personas no especialistas en acústica.

No existen valores de R_w aconsejados para una fachada, pero a título informativo diremos que en la Norma IRAM 4044 [9] se marcan los valores mínimos aconsejados para muros divisorios. Ellos son:

Muros internos de viviendas ----- $R_w = 40$ dB
Muros medianeros en viviendas ----- $R_w = 44$ dB
Muros entre aulas y pasillos o exterior ----- $R_w = 44$ dB

En las fachadas comunes se obtienen valores de R_w mucho menores debido a que la inclusión de la abertura para lograr iluminación y ventilación naturales provoca una caída del aislamiento.



Para justipreciar R_w en fachadas medidas directamente (in situ) se debe disponer de la tabla de valores de R en función de frecuencia obtenidos mediante el procedimiento de la Norma respectiva. En nuestro caso conocemos estos índices para las bandas de tercios de octava que van desde 100 Hz a 5000 Hz.

Para el cálculo del número NR deben cumplirse tres pasos:

- * Obtener el espectro del ruido en el exterior de la fachada.
- * Obtener el espectro de ruido en el interior de la habitación.
- * Calcular NR con el procedimiento dado en la Norma IRAM 4070 [10].

Se dice que una fachada es acústicamente mejor cuanto menor sea el NR que resulte en el interior del edificio.

Existen listas de los números NR máximos aconsejados en el interior de diversos locales, en distintas situaciones, es decir según la zona sea residencial, industrial u otras, por ejemplo en Normas DIN [11] y trabajos de Leo Beranek publicados en EE.UU. [12].

En base a ello puede estimarse que en un aula debe existir, como máximo, $NR = 35$

En nuestro caso resultó:

$$NR_{\text{exterior}} = 74 \quad NR_{\text{interior}} = 57 \quad R_w = 27 \text{ dB}$$

El valor de $NR = 57$ en el aula es muy elevado para dictar una clase en forma normal, por lo que es aconsejable adoptar medidas tendientes a lograr una reducción de este índice para adecuarse a las normas en la materia.

Para mejorar esta situación deberá aumentarse el aislamiento de la fachada, y en especial el de la ventana, ya que una modificación del muro tiene una influencia despreciable.

En este caso se colocó una segunda ventana, con las características acústicas antes descriptas, con una separación de la original de 13 cm, que era el máximo espacio disponible. Luego se realizó una nueva determinación del aislamiento con el siguiente resultado:

$$NR = 36 \quad R_w = 44 \text{ dB}$$

Nótese que prácticamente se ha llegado a lo pretendido en cuanto a sonoridad dentro del aula ($NR = 35$), y también al valor de R_w aconsejado, con lo que se ha logrado un adecuado confort acústico para desarrollar las clases en forma normal sin interferencia de ruidos externos.

A la vez, se ha disminuido RF a 53.1 dB, con lo que el enmascaramiento es mucho menor.

O sea que las modificaciones descriptas han permitido corregir teóricamente las deficiencias que impiden la buena difusión de la palabra en el aula tratada.

Una etapa posterior del presente trabajo consistirá en la determinación experimental de los TR, una vez implementadas las reformas propuestas, y en su comparación con los resultados calculados con la metodología aquí descripta, a fin de analizar el comportamiento y la precisión del modelo teórico utilizado.

REFERENCIAS

[1] Yacoel D. Acondicionamiento acústico. Facultad de Arquitectura, Montevideo, Uruguay, 1981.



- [2] Méndez A, Stornini A, Salazar E, Giuliano H, Velis A y Amarilla B, Acústica Arquitectónica. Universidad del Museo Social Argentino, Buenos Aires, 1994.
- [3] Parkin P H, Humphreys H R. Acoustics, Noise and Buildings. Faber and Faber, London, 1969.
- [4] Knudsen V O. Architectural acoustics. John Wiley & Sons, New York, 1932.
- [5] Brüel P V. Sound insulation and room acoustics. Chapman & Hall, London, 1951.
- [6] Richardson E G. Technical Aspects of Sound. Elsevier, London, 1953.
- [7] ISO 140. Acoustics. Measurements of sound insulation in buildings and of building elements. Equivalente a IRAM 4063. Transmisión de sonido en edificios. Métodos de medición, 1982.
- [8] ISO 717. Rating of sound insulation in building and of building elements. Equivalente a IRAM 4043. Aislamiento del sonido en edificios, 1984.
- [9] IRAM 4044. Protección contra el ruido en edificios. Aislamiento acústico mínimo de tabiques y muros, 1985.
- [10] IRAM 4070. Procedimiento para la evaluación de ruidos utilizando las curvas NR, 1986
- [11] DIN 4109. Noise-control in Buildings. Sheet 2. Requirements, 1983.
- [12] Beranek L. et al. Preferred noise criterion (PNC) curves and their application to rooms. JASA Vol 50, 1971.

