



V Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construido e
II Encuentro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construido

ESTUDIO PARA LA MEJORA DE LA COMUNICACIÓN EN AULAS ARGENTINAS. CÁLCULO DEL TRATAMIENTO ACÚTICO.

A Méndez & A Stornini

Laboratorio de Acústica y Luminotecnia

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

fax + 54 (221) 484-2686

E-mail: ciclal@qba.gov.ar

L Ercoli & A Azzurro

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Bahía Blanca

11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, ARGENTINA

E-mail: lercoli@criba.edu.ar

RESUMEN

El factor fundamental que afecta la comunicación en las aulas es la inteligibilidad, que se define como el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por un oyente. La inteligibilidad está relacionada con el Tiempo de Reverberación y con el Ruido de Fondo de la sala donde se realiza una conferencia.

Para corregir los Tiempos de Reverberación se deberá agregar materiales absorbentes del sonido en cantidad suficiente. Dichos materiales deben elegirse teniendo en cuenta sus correspondientes coeficientes de absorción acústica en función de la frecuencia.

Para disminuir el Ruido de Fondo de los locales se deberá estudiar fundamentalmente el aislamiento que ofrecen las puertas y ventanas, en especial aquellas que comunican con el exterior.

Todos estos factores se analizan en el trabajo y se proponen las soluciones más convenientes para mejorar las características acústicas de cada aula estudiada.

ABSTRACT

The fundamental factor that affects the communication in the classrooms is the intelligibility that is defined as the percentage of words correctly interpreted by a listener. The intelligibility is related with the Reverberation Time and with the Background Noise of the conference room.

To correct the Reverberation Time it will be added sound absorbent materials in enough quantity. This materials should be chosen keeping in mind their corresponding coefficients of acoustic absorption in function of frequency.

To reduce the Background Noise of the local it will be studied the isolation that offer the doors and windows, especially those that communicate with the exterior.

All these factors are analyzed in the work and they intend the most convenient solutions to improve the acoustic characteristics of each studied classroom.

1 - INTRODUCCION

En las referencias [Ercoli] y [Hodgson] se analizan extensamente los parámetros y criterios que intervienen en esta problemática, demostrándose que existen tiempos de reverberación óptimos para cada local, en función de su volumen y de su destino. En el caso de aulas, donde se debe optimizar la comprensión del mensaje oral, diferentes investigadores aconsejan adoptar Tiempos de Reverberación (TR) cercanos a 0,5 segundos, en las frecuencias correspondientes al habla [Lilly] y [Abbot]. Para lograr menores TR, se elige el tipo y cantidad de materiales absorbentes sonoros a colocar en cada una de las aulas analizadas.

El factor fundamental que afecta la comunicación docente-alumno es la inteligibilidad, propiedad que se define como el porcentaje de palabras correctamente interpretadas por el oyente. Se aconseja que el índice de inteligibilidad sea superior al 80%. Este se halla relacionado con TR y con RF. Para mejorar la inteligibilidad se deberán acortar los TR y aumentar la relación señal a ruido [Ercoli].

Las mediciones realizadas en las aulas mostraron que tanto el TR como el RF tienen valores incorrectos de acuerdo a la función para la que fueron destinadas.

Para adecuar los TR se deberá agregar materiales absorbentes del sonido en cantidad suficiente. Dichos absorbentes se clasifican en tres tipos, de acuerdo al

proceso por el cual degradan la energía sonora, a saber: materiales porosos, membranas resonantes y resonadores agujereados o de ranura.

Cada tipo se caracteriza por la zona de frecuencia donde la absorción es más notoria, por lo cual se usará uno u otro tipo según las frecuencias donde se deba corregir TR.

Cabe consignar que los TR se midieron 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 [Yacoel] y [Méndez] están dadas en esa forma.

Cuando se utilicen datos de los materiales medidos en nuestro Laboratorio, que fueron calculados 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.

2 - MEDICIONES

Se realizaron mediciones de TR en cuatro aulas de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional y en la sala de lectura y tres aulas del Colegio La Inmaculada.

A los fines de notación, se designan las aulas con los siguientes códigos:

UTN 1: Aula 805, 8° Piso, División: 3er. Nivel Ing. Mecánica

UTN 2: Aula 603, 6° Piso, División: 1er. Nivel Ing. Mecánica

UTN 3: Aula 403, 4° Piso, División: 3er. Nivel Ing. Electrónica

UTN 4: Aula 202, 2° Piso, División: 1er. Nivel Lic. Organización Industrial

L I 1: 1er. Piso, División 8° B (EGB), Alumnos de 13 años.

L I 2: 1er. Piso, División 9° A (EGB), Alumnos de 14 años.

L I 3: 2° Piso, División 3° A (Media), Alumnos de 15 años.

L I 4: Primer piso, Biblioteca: sala de lectura.

Se calculó el Índice de Reducción Acústica (R) con el método de ISO 140 ó IRAM 4063 y el Índice de Reducción Acústica Compensado (Rw) según lo detallado en ISO 717 ó IRAM 4043.

Para medir el RF se utilizó un día laborable normal aunque sin actividad académica ni administrativa en la UTN para determinar el ruido proveniente del exterior. Se encontró así que con la Facultad vacía, en el Aula UTN 4 el ruido de fondo resultó: $L_{eq} = 43$ dBA.

En las mismas condiciones pero en el caso del Aula L I 1 del Colegio (a la calle, con una parada de ómnibus en la vereda de enfrente), con una ventana abierta, el Nivel Sonoro fue $L_{eq} = 70,4$ dBA, con un pico máximo, durante el período de integración, de $L_{m\acute{a}x} = 86,6$ dBA, debido a la aceleración de un ómnibus al dejar la parada.

3 - MEDICIONES EFECTUADAS

Los TR de las aulas fueron medidos para los tercios de octava comprendidos entre 100 y 5000 Hz, en dos condiciones: aula vacía y aula ocupada con los alumnos habituales, y para dos posiciones de micrófono, al frente y al fondo del aula. A continuación se incluye la tabla de valores de los TR promedio para cada aula, en condición vacía, para las bandas de frecuencia que se investigarán.

Tabla 1 Tiempos de Reverberación medidos

	UTN 1	UTN 2	UTN 3	UTN 4	L I 1	L I 2	L I 3	L I 4
	TR (s)	TR (s)	TR (s)	TR (s)	TR (s)	TR (s)	TR (s)	TR (s)
Banda								
125	2.84	3.77	2.56	3.97	2.42	2.75	2.35	2.10
250	3.01	3.05	3.08	3.76	2.12	3.36	2.6	1.87
500	2.70	2.30	2.65	3.37	1.64	2.74	1.86	1.48
1000	2.53	2.07	2.45	2.79	1.62	2.52	1.76	1.46
2000	2.09	1.90	2.08	2.22	1.56	2.21	1.73	1.45
4000	1.62	1.60	1.63	1.66	1.52	1.69	1.59	1.45

Luego de medir el índice de reducción sonora (R) entre un aula del Colegio (8° B) y el pasillo, se calculó el valor del índice R_w , que resultó: $R_w = 27$ dB

4 - CRITERIOS DE CALCULO

Para conocer los TR óptimos en cada caso se consultó la bibliografía de Yacoel, Parkin y Knudsen. Ella muestra gráficos de los TR recomendados para difusión de palabra, en función del volumen de la sala, los que convertidos a forma analítica resultan en ecuaciones.

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

$$TR = 0,28 + 0,18 * \log V \text{ Si } V \text{ se expresa en } m^3, \text{ TR resulta en segundos.}$$

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

Para la sala de lectura, dado su destino (no se emite palabra), conviene adoptar TR mucho más cortos, similares a los de un estudio de radio o de grabación, ya que se pretende que los ruidos se atenúen rápidamente. Por ello, conociendo su volumen de $203 m^3$, se adoptó en este caso $TR = 0,4$ s.

Estos valores son para frecuencias de 500 Hz o más; para frecuencias bajas se los deberán afectar de un factor dado por Brüel 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.

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 TR 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, [Beranek].

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

Donde: TR = Tiempo de reverberación (s). SL = Superficie interna de la sala (m²).

V = Volumen del local (m³). 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) depende de Ap y n (absorción y número de personas).

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

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

$\alpha_p = \alpha_v + Aa / SL$ Siendo α_p el α promedio, a sala ocupada.

Agregando ahora un cierto material absorbente, del que debemos conocer su coeficiente de absorción α_m , en cada banda de octava, en Sabines/m², y la cantidad colocada, S, en m², el coeficiente de absorción del local aumentará a:

$$\alpha_f = \alpha_v + Aa / SL + \alpha_m S / SL$$

El TR final será: $TR_f = 0,16 V / A_f$ Donde: $A_f = - SL \cdot \ln (1 - \alpha_{f1})$

Este procedimiento debe repetirse para las 6 bandas de octava y pueden emplearse distintos números n de personas. Surgirán los TR en cada condición, que deberán compararse con los óptimos ya calculados.

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.

A los efectos de fijar la ocupación habitual de cada aula se adoptó el criterio de tomar un 50% de la capacidad máxima para las aulas de la UTN, donde se dictan diversos cursos, y un 100% para las aulas del Colegio, donde el alumnado es prácticamente fijo.

5 - TRATAMIENTO ACUSTICO

En la tabla siguiente se indican, sólo para las octavas elegidas (125 a 4000 Hz), los TR medidos, en segundos, en cada local, con aula vacía (TRv); la banda de TR óptimos (TRop) y los TR finales (TRf), a que se llega luego del tratamiento acústico propuesto y con la ocupación habitual del aula.

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

Tabla 2 Tiempos de Reverberación iniciales y finales

	Volumen	Superficie SL	TR	Octavas (Hz)					
				125	250	500	1000	2000	4000
	m ³	m ²	(s)						
			TRv	2.84	3.01	2.70	2.53	2.09	1.62
UTN 1	189.1	152.1	TRop	0.88 a 1.08	0.70 a 0.86	0.61 a 0.74	0.61 a 0.74	0.61 a 0.74	0.61 a 0.74
			TRf	1,09	0,73	0,64	0,63	0,61	0,70
			TRv	3.77	3.05	2.30	2.07	1.9	1.6
UTN 2	287.0	243.0	TRop	0.93 a 1.14	0.74 a 0.91	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78
			TRf	1.08	0.79	0.79	0.67	0.66	0.64
			TRv	2.56	3.08	2.65	2.45	2.08	1.63
UTN 3	111.5	145.9	TRop	0.85 a 1.04	0.68 a 0.83	0.58 a 0.71	0.58 a 0.71	0.58 a 0.71	0.58 a 0.71
			TRf	1.02	0.71	0.63	0.60	0.58	0.65
			TRv	3.97	3.76	3.37	2.79	2.22	1.66
UTN 4	248.6	268.0	TRop	0.93 a 1.14	0.74 a 0.91	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78	0.64 a 0.78
			TRf	1.05	0.75	0.83	0.64	0.66	0.67
			TRv	2.42	2.12	1.64	1.62	1.56	1.52

LI 1	184.0	204.6	TRop	0.90 a 1.10	0.72 a 0.88	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76
			TRf	1.16	0.76	0.64	0.62	0.63	0.76
			TRv	2.75	3.36	2.74	2.52	2.21	1.69
LI 2	179.9	201.2	TRop	0.90 a 1.10	0.72 a 0.88	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76
			TRf	1.09	0.77	0.66	0.63	0.62	0.68
			TRv	2.35	2.60	1.86	1.76	1.73	1.59
LI 3	184.0	204.6	TRop	0.90 a 1.10	0.72 a 0.88	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76	0.62 a 0.76
			TRf	1.10	0.78	0.64	0.61	0.62	0.72
			TRv	2.10	1.87	1.48	1.46	1.45	1.45
LI 4	202.8	221.7	TRop	0.53 a 0.64	0.42 a 0.51	0.36 a 0.44	0.36 a 0.44	0.36 a 0.44	0.36 a 0.44
			TRf	0.55	0.44	0.45	0.36	0.36	0.41

Para realizar el tratamiento acústico se recomendaron los siguientes absorbentes sonoros:

- Resonador: Recubrimiento de madera, de 20 mm de espesor, con tablas de 10 cm de ancho separadas por ranuras de 2 cm (ranuras de 20%), con hueco atrás de 50 mm lleno de lana de vidrio (50 kg/m³).
- Membrana: Placa de madera aglomerada de 6 mm de espesor, con hueco atrás de 50 mm lleno de lana de vidrio (50 kg/m³).
- Cortinaje: Cortina liviana, de 0,5 kg/m², plegada al 50 %.
- Alfombrado: Alfombra sintética de 6 mm de espesor.
- Paneles colgantes: Paneles de lana de vidrio, de 60 x 120 x 5 cm, recubiertos con polietileno de 40 micrones, dispuestos en filas separadas 1,20 m .

A continuación se indican las cantidades de absorbentes recomendadas en cada aula, para lograr los TR finales:

UTN 1: 24 m² de resonador.

UTN 2: 30 m² de membrana y 30 m² de cortinaje..

UTN 3: 18 m² de membrana y 30 m² de cortinaje.

UTN 4: 30 m² de membrana y 35 m² de cortinaje.

L I 1: 20 m² de resonador.

L I 2: 21 m² de resonador.

L I 3: 20 m² de resonador.

L I 4: 45m² de membrana, 50 m² de alfombrado y 52 paneles colgantes.

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 descrita, a fin de analizar el comportamiento y la precisión del modelo teórico utilizado.

Con respecto al aislamiento medido entre el aula de 8° B y el pasillo del Colegio, puede decirse que es insuficiente, de acuerdo a lo aconsejado en IRAM 4044 y DIN 4109. Para mejorar este aspecto de las aulas sería aconsejable adosar, en las ventanas que las vinculan al pasillo, un panel de vidrio fijo, de no menos de 6 mm de espesor y cambiar las puertas de entrada (actualmente de dos hojas y vidrio repartido) por otras de mayor aislamiento, por ejemplo de madera maciza, de 5 cm de espesor, de una sola hoja, con burletes y una pequeña ventana con vidrio de al menos 6 mm, para mantener la visual.

6 - REFERENCIAS

Abbot P et al. Pilot studies of speech communication in elementary school classrooms: literature review and methods. NOISE-CON 97, Pennsylvania, EE.UU, 15-17 Junio 1977.

American Speech-Language and Hearing Association (ASHA). Guidelines for acoustics in educational environments, 37, Suppl. 14, pp. 15-19, 1995.

Brüel P V. Sound insulation and room acoustics. Chapman & Hall, London, 1951.

DIN 4109. Noise-control in Buildings. Sheet 2. Requirements, 1983.

Ercoli L, Azzurro A P, Méndez A M y Stornini A J. Caracterización sonora de aulas: Un estudio de los principales parámetros acústicos en aulas argentinas. Parte 1: Diagnóstico. UTN/FRBB-LAL, Octubre 1998.

Hodgson M, Rempel R, Kennedy S. Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. Journal of the Acoustical Society of America 105(1), 226-233, 1999.

IRAM 4044. Protección contra el ruido en edificios. Aislamiento acústico mínimo de tabiques y muros, 1985.

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.

ISO 717. Rating of sound insulation in building and of building elements. Equivalente a IRAM 4043. Aislamiento del sonido en edificios, 1984.

Knudsen V O, Harris C M. Acoustical designing in architecture. John Wiley & Sons, London, 1950.

Lilly J G. Establishing acoustical standards for classrooms. Sound and Vibration, 5-6, Dec. 1997.

Méndez A, Stornini A, Salazar E, Giuliano H, Velis A y Amarilla B, Acústica Arquitectónica. Universidad del Museo Social Argentino, Buenos Aires, 1994.

Parkin P H, Humphreys H R. Acoustics, Noise and Buildings. Faber and Faber, London, 1969.

Richardson E G. Technical Aspects of Sound. Elsevier, London, 1953.

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