

Calidad y acondicionamiento acústico en edificaciones

Acoustic quality and treatment in buildings

Qualidade e condicionamento acústico em edifícios

Este texto corresponde a una conferencia dictada en el I Seminario sobre Sostenibilidad en la Construcción, organizado por el Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, Colombia, en agosto de 2010. Se han actualizado algunos aspectos puntuales para mantener la vigencia del artículo.

Alice Elizabeth González¹ 

¹Departamento de Ingeniería Ambiental – IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, URUGUAY

Correo de contacto: elizabet@fing.edu.uy

Resumen

La calidad de la construcción está estrechamente ligada a la función de los edificios y a su contexto. Involucra diversos aspectos, como habitabilidad, seguridad, durabilidad, estética, cuyos costos se encuentran incorporados naturalmente en los proyectos. Sin embargo, el diseño de locales desde el punto de vista acústico parece estar reservado a usos especiales, y suele ser dejado de lado en edificios que ameritarían un tratamiento no menos cuidadoso en ese sentido, como los destinados a locales educativos. Se presentan algunos parámetros de calidad acústica en interiores, se evalúan algunas soluciones constructivas tanto desde el punto de vista de su desempeño acústico como de su costo, y se muestra una evaluación de algunas aulas de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR (Uruguay). A modo de conclusión, se plantea la necesidad de internalizar los costos requeridos para lograr una buena calidad acústica, considerándolos como parte de la inversión y no como un gasto suuntuario.

Palabras clave: calidad acústica, acústica de locales, acústica de aulas, calidad de la construcción

Abstract

The quality of construction is closely related to the functionality of the buildings in their environment. It is achieved by different issues, as habitability, safety, durability, aesthetics. Its costs are naturally incorporated in the whole costs of the projects. But the acoustic design seems to be considered only for special buildings, not including classrooms. Some parameters about acoustic quality of rooms are presented. The cost and acoustic behaviour of some constructive solutions are compared. A case of study about classrooms of the Faculty of Engineering (UdelaR, Uruguay) is presented. The necessity of internalizing the costs of a good acoustic design is concluded: they are investment costs and not useless expenses.

Keywords: acoustic quality, rooms acoustics, classrooms acoustics, construction quality

Resumo

A qualidade da construção está intimamente ligada à função dos edifícios e ao seu contexto. Envolve vários aspectos, como habitabilidade, segurança, durabilidade, estética, cujos custos são naturalmente incorporados aos projetos. No entanto, do ponto de vista acústico, o desenho das instalações parece estar reservado a usos especiais, sendo habitualmente deixado de lado em edifícios que mereceriam um tratamento não menos cuidadoso a este respeito, como os destinados a espaços educativos. São apresentados alguns parâmetros de qualidade acústica em interiores, algumas soluções construtivas são avaliadas tanto do ponto de vista do seu desempenho acústico como do seu custo, e é apresentada uma avaliação de algumas salas de aula da Faculdade de Engenharia da UdelaR (Uruguai). Em conclusão, surge a necessidade de internalizar os custos necessários à obtenção de uma boa qualidade acústica, considerando-os como parte do investimento e não como um gasto suuntuoso.

Palavras-chave: qualidade acústica, acústica de salas, acústica de salas de aula, qualidade de construção

 <https://orcid.org/0000-0002-2827-5052>

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la construcción ha estado intrínsecamente ligada a la función de los edificios y a su inserción espaciotemporal, tanto en lo sociocultural como en lo geográfico. Así, por ejemplo, los materiales que se emplean, las formas, dimensiones, acondicionamiento interior, reflejan de algún modo estos aspectos: no es azar que las construcciones de zonas en las que ocurren movimientos telúricos sean estructuralmente diferentes a las que se construyen en donde no ocurren tales movimientos; los climas extremos definen materiales y tipo de aberturas; las características de la familia tipo de una sociedad (en particular su número de integrantes) inciden sobre la cantidad y dimensiones de las habitaciones en las viviendas.

En la medida en que la calidad de la edificación tiene una incidencia obvia en su costo, al irse generando soluciones habitacionales al alcance de usuarios de menores ingresos, es esperable que esas soluciones carezcan de un estudio de calidad acústica y en consecuencia no satisfagan criterios mínimos de aislamiento a la propagación de ruido por vía aérea.

Del mismo modo, el comportamiento acústico de las aulas de locales educativos recibe por lo general poca atención a la hora de proyectar (Beristáin, 1998), lo que luego puede redundar en elevados niveles de ruido de fondo o condiciones deficitarias en lo relativo a la inteligibilidad de la palabra hablada. Abundantes y de larga data son las publicaciones en ese sentido, mostrando deficiencias en la calidad de aulas tanto en países europeos como latinoamericanos, (Vela et al., 1997; Bordinhao de Matos et al., 1998; Díaz Sanchidrián y Pedrero González, 1998; Urea y Rolla Bertoli, 1998; Gonzalo, 2001; Medina Valdez, 2009).

Dado que las sociedades urbanas de nuestros días conviven con niveles de ruido más o menos importantes, especialmente a causa del crecimiento sostenido de la flota automotriz, es probable que falte aún cierto tiempo para que las características acústicas de los locales pasen a ser una componente natural de la calidad de la edificación.

2. RUIDO Y SONIDO

El Diccionario de la Real Academia Española define ruido como “*sonido inarticulado, por lo general desagradable*”. Al hablar de ruido surge entonces, implícitamente, la idea de un sonido que no es deseado por receptor o, dicho de otro modo, que interfiere con la señal “útil” o portadora de información relevante para el receptor. Por lo tanto, la diferencia entre sonido y ruido tiene, innegablemente, aspectos subjetivos (González et al., 2008).

El grado de molestia asociado con un ruido depende fuertemente de su nivel de presión sonora, pero no es ésta la única característica que tiene que ver con la molestia generada: también el contenido semántico es importante, así como la composición espectral, la variabilidad temporal, la presencia de componentes impulsivos, la presencia de componentes repetitivos – impulsivos o no-, la presencia de tonos puros o de abundantes componentes en bajas frecuencias, la relación con el ruido de fondo en cuanto a niveles y a composición espectral, la actividad que se pretende realizar en presencia del ruido en cuestión (González et al., 2008).

3. CALIDAD ACÚSTICA

La *calidad acústica* de un local se relaciona con su aptitud para el uso que se ejerce o se desea ejercer sobre él. Dice Medina Valdéz (2009): “*La calidad del ambiente acústico es la característica del espacio arquitectónico, en donde se pretende generar un estado de satisfacción o bienestar físico y mental del ser humano en su percepción auditiva*”.

Un ambiente tiene una buena calidad acústica para cierto uso si éste se puede ejercer sin que se genere perturbación o molestia alguna a los receptores presentes en él.

Si bien la relación entre ruido y molestia es bastante compleja, Querol i Noguera (1994) señala cuatro puntos principales al respecto: “*si el ruido se siente, es molesto; si causa interferencia, es molesto; si invade el territorio de una persona, es molesto; si perturba el bienestar o la salud, tanto en lo fisiológico como en lo psicológico, es molesto*”.

Medina Valdéz (2009) precisa: “*un ambiente acústico satisfactorio se define como aquel en el cual el carácter y la magnitud de todos los sonidos son compatibles con el uso del espacio*”, en tanto “*un ambiente confortable es aquel donde no existe distracción o molestia, de tal manera que las tareas o las actividades puedan realizarse sin perturbaciones físicas y mentales*”.

4. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA DE LOCALES

El confort o la calidad acústica de un local dependen de varios factores, de los cuales los principales son:

- tiempo de reverberación adecuado al uso y tamaño del local
- balance adecuado entre sonido directo y reverberante
- intimidad y uniformidad del sonido en el local (buena difusión)
- privacidad o aislamiento del ruido exterior
- nivel y composición del ruido de fondo.

Los parámetros que a continuación se presentan son los que usualmente se emplean para cuantificar dichos factores.

4.1 Tiempo de reverberación T_R

El tiempo de reverberación es el parámetro de calidad acústica de locales por excelencia, aunque no es el único. Se designa como tiempo de reverberación de un local al tiempo que tarda la energía acústica presente en él en reducirse a una millonésima parte de la que existía en el momento en que se interrumpe la emisión desde una fuente sonora interior al local. Dicho de otro modo, es el tiempo que tarda el nivel sonoro en un local en decaer 60 dB a partir del momento en que se interrumpe la emisión desde dicha fuente sonora (González et al., 2008). Debe medirse en la zona de campo reverberante del local en cuestión.

Si bien el tiempo de reverberación varía según la frecuencia que se considere, usualmente se toma como referencia o parámetro de diseño el tiempo de reverberación a 500 Hz.

De acuerdo con el Código Técnico de la Edificación DB-HR de España (2009), el tiempo de reverberación en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario) cuyo volumen sea inferior a 350 m³, no debe ser mayor que 0,7 s. En caso de que se considere el total de butacas de la sala con ocupación nula -siempre en la hipótesis de que la sala en cuestión tenga volumen inferior a 350 m³-, el tiempo de reverberación no será mayor que 0,5 s.

El tiempo de reverberación tiene un rol protagónico en la inteligibilidad de la palabra, e incide a su vez fuertemente en los posibles usos que se puede asignar a un local para que los mismos se puedan practicar en forma efectiva y confortable (González et al., 2008).

4.2 Calidez

La *calidez acústica* de un local se refiere a la relación que existe entre los tiempos de reverberación a bajas frecuencias y a frecuencias medias (Kinsler et al., 1992).

La *calidez acústica* representa la respuesta del local en frecuencias graves. Cuando se tiene un contenido importante de frecuencias graves, se dice que se trata de un ambiente *acústicamente cálido*. La calidez acústica se calcula como el cociente entre la suma de los T_R a 125 Hz y 250 Hz, y la suma de los T_R en las bandas de 500 Hz y 1000 Hz (Carrión Isbert, 1998; Aulestia Valencia, 2010):

$$C = \frac{T_{R,125} + T_{R,250}}{T_{R,500} + T_{R,1000}}$$

4.3 Intimidad

Tiene que ver con el tiempo que tardan en llegar las primeras ondas reflejadas luego de la llegada de la señal principal. Se considera que la condición de intimidad de una sala es buena cuando este retardo es menor que 20 ms (Kinsler et al., 1992).

4.4 Modos normales

Son los modos naturales de vibración del aire contenido en un recinto, y sus frecuencias dependen de las relaciones entre las tres dimensiones del mismo (largo, ancho y altura). En presencia de modos normales, aparecen puntos en que las señales acústicas se ven fuertemente amplificadas, en tanto en otros sufren un gran decaimiento, lo que da por resultado una respuesta del local acústicamente heterogénea y una fuerte dependencia de la posición que se ocupe dentro de él en cuanto a condiciones de audibilidad (Carrión Isbert, 1998; Aulestia Valencia, 2010).

Existen tratamientos acústicos que permiten corregir los problemas que genera la presencia de modos normales, pero la mejor opción es evitarlos desde el comienzo, desde el diseño del local.

4.5 Inteligibilidad de la palabra

La mayor información en un mensaje hablado viene dada por las consonantes, que tienen menor duración y mayor frecuencia que las vocales (Carrión Isbert, 1998; Aulestia Valencia, 2010). El idioma español tiene solamente 5 vocales y 22 consonantes, lo que da una idea de la importancia de estas últimas en la comprensión del mensaje oral. A esto debe agregarse que los sonidos de frecuencias más altas se absorben, se aíslan y se enmascaran con mayor facilidad; también son las primeras frecuencias en que el oído humano experimenta pérdida auditiva por presbiacusia, es decir, al envejecer.

Si bien se trata de un aspecto subjetivo, para tener una buena inteligibilidad de la palabra hablada el retardo entre la llegada del sonido directo y las primeras reflexiones al oído del receptor no debe superar los 50 ms (Kinsler et al., 1992; Carrión Isbert, 1998; Aulestia Valencia, 2010).

La inteligibilidad puede variar dentro de un mismo local, por lo que debe determinarse en diferentes puntos del mismo.

Existen métodos y parámetros objetivos que permiten cuantificar la inteligibilidad en un local, en particular los índices STI y RASTI (Kinsler et al., 1992; Carrión Isbert, 1998; Aulestia Valencia, 2010).

4.6 Índice RASTI (Rapid Speech Transmission Index)

Es una variante simplificada del Speech Transmission Index (STI). Se basa en un sistema transmisor – receptor. El transmisor genera una señal estandarizada en cuanto a frecuencias (ruido rosa en las bandas de octava normalizadas entre 500 Hz y 2000 Hz), modulación y direccionalidad, y el receptor la analiza y devuelve el valor del RASTI, que está comprendido entre 0 y 1 (Gonzalo et al., 2001).

4.7 Índices de Articulación (silábico IPAS, de palabras IPAP, de frases IPAF)

Los *índices de articulación* dan información a propósito del porcentaje de sílabas, palabras o frases de sendos conjuntos estandarizados que son comprendidos en un local teniendo en cuenta la intensidad de la señal, el ruido de fondo -nivel y variabilidad- y la reverberación (González et al., 2008).

4.8 SIL (Speech Interference Level)

Este índice se refiere a la calidad de un recinto para que en él la palabra hablada sea fácilmente comprensible. El valor del SIL es el promedio aritmético de los niveles de presión sonora del ruido de fondo en las bandas normalizadas entre 500 Hz y 4000 Hz; en estas bandas justamente ocurre la mayor parte de la energía que emiten las voces humanas cuando hablan (González et al., 2008).

4.9 PSIL (Preferred Speech Interference Level)

Es un índice similar al SIL, con la diferencia de que emplea la media aritmética de los niveles de presión sonora en las frecuencias 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz. Se diferencia del SIL en que el PSIL no considera la frecuencia de 4000 Hz (González et al., 2008).

4.10 Ruido de fondo

Es el que existe en un local cuando en él no se realiza ninguna actividad específica. Es el resultante de las fuentes sonoras externas y del funcionamiento de equipamiento que genera niveles sonoros más o menos estables dentro del local en cuestión, como equipos de aire acondicionado u otros artefactos eléctricos; puede haber eventualmente aportes del funcionamiento de otras instalaciones, como las sanitarias.

La calificación del nivel de ruido de fondo en un local a los efectos del confort acústico no se realiza teniendo únicamente en cuenta el valor expresado en escala de ponderación A; también interesa la composición espectral del ruido de fondo. Para tener en cuenta

ambos aspectos simultáneamente, se emplean criterios que se expresan a través de familias de curvas y que permiten calificar con un número único las características de nivel y composición del ruido de fondo. Algunos de estos criterios se presentan en el punto siguiente (González et al., 2008).

5. CURVAS CRITERIO PARA EVALUAR CALIDAD ACÚSTICA EN INTERIORES

Existen varios criterios de calidad acústica en interiores, dados por familias de curvas que están definidas por valores en dB (sin ponderación, o sea en escala Z) para cada banda de octava normalizada en una cierta porción del rango audible, que abarca por lo menos el intervalo entre 125 Hz y 4000 Hz. Los usos más frecuentes de estas curvas son dos (González et al., 2008):

- Definir los máximos niveles sonoros de ruido de fondo admisibles en un local en cada banda de octava, para cumplir con la recomendación de calidad acústica para un cierto uso.
- Verificar si la calidad acústica de un local es o no recomendable para determinado uso.

Para varios de estos criterios, el número de curva que corresponde a un espectro dado es la envolvente inmediata superior de todos los niveles que definen dicho espectro; para otros, es el valor del SIL.

Una de las ventajas del uso de curvas de calidad o confort acústico en interiores es que, a la vez de lograr un diagnóstico acerca de la aptitud del local, se conoce también en cuál o cuáles bandas de frecuencia habría que actuar para alcanzar un cierto estándar de calidad para un uso en particular.

5.1 Curvas NC (Noise Criterion)

Es el conjunto de curvas más antiguo; fue desarrollado hacia fines de los '50, con la intención de caracterizar ambientes cerrados para lograr una buena inteligibilidad de la palabra o un ámbito en que escuchar música resultara placentero.

Además de la especificación de las curvas en bandas de octava normalizadas entre 63 Hz y 8000 Hz inclusive, que se expresa en dB (sin empelar ninguna ponderación frecuencial, es decir, son niveles en escala Z), se brinda una tabla en que se presentan los valores NC recomendados para diversos usos del local en cuestión (González et al., 2008).

5.2 Curvas PNC (Preferred Noise Criterion)

Se trata de una revisión de las curvas NC que se realizó a comienzos de los '70, para tener en cuenta los

avances en materia de estudios psicoacústicos que se habían dado en los últimos 10 años. Las curvas PNC amplían el rango de trabajo de las curvas NC (González et al., 2008).

5.3 Curvas NR (Noise Rating)

Las curvas NR cubren un espectro bastante más amplio que las curvas NC y PNC, no sólo en cuanto a frecuencias sino especialmente en cuanto a niveles de presión sonora. Además de una tabla con valores de las curvas NR adecuados para diferentes usos del local que se estudia, también se propone una correspondencia con los niveles sonoros ambientales expresados en escala A: se estima que el nivel de presión sonora en escala A es numéricamente mayor que el número de curva NR en 10 unidades, aunque esto es estrictamente válido únicamente en un rango de valores más estrecho que aquel para el cual están definidas las curvas (González et al., 2008).

5.4 Curvas RC (Room Criteria)

Estas curvas, propuestas por Blazer en 1981, están basadas en los valores de nivel de presión sonora obtenidos para las frecuencias centrales de las octavas que van de 16 Hz a 4000 Hz, e integradas por dos descriptores: un número de curva que coincide con el valor del PSIL, y una letra que indica la calidad del sonido descrita por un observador, y que puede ser N (neutral), R (rumble, ruido de baja frecuencia), H (ruido de alta frecuencia o siseo), RV (ruido que genera vibraciones perceptibles acústicamente inducidas) (González et al., 2008). Cualquier local que merezca una calificación que no sea N podría ameritar un análisis acústico para mejorar sus condiciones, en función de su destino actual o deseado.

5.5 Curvas NCB (Balanced Noise Criterion)

Se basan en las curvas NC, que en este caso fueron ampliadas por L. Béranek hacia frecuencias más altas y más bajas que las originales, cubriendo ahora desde 16 Hz a 8000 Hz. En la misma línea que las curvas RC, la categorización que se obtiene viene dada por un número de curva NCB (que coincide con el PSIL) y un calificativo (N, R, H, RV) (Béranek, 1989).

6. CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD ACÚSTICA

La buena calidad de una construcción se relaciona con la calidad en distintos aspectos, como habitabilidad,

seguridad, durabilidad, estética, entre otros. Estos puntos –y, en particular, sus costos–, se encuentran incorporados naturalmente en los costos del proyecto, pero no sucede exactamente lo mismo en materia de calidad acústica, que suele ser olvidada, desestimada o sentida como motivo de gasto y no como parte de la inversión.

A continuación, se realiza un análisis comparativo del comportamiento de un conjunto de materiales, tanto desde el punto de vista de su desempeño acústico como de su costo, siguiendo el modelo de análisis que se presenta en Méndez et al. (1994). A los efectos de evaluar la calidad acústica de distintos paramentos, se comparan los valores del índice R_w (índice de reducción acústica compensado) de cada solución para caracterizar su aislamiento a ruido aéreo. En lo referente a divisorios horizontales (entrepisos), la comparación se hace a partir de su aislamiento a ruido de impacto dado por ΔN_w (índice de reducción del sonido de impacto, compensado). Los valores de estos índices fueron tomados de Méndez et al. (1994); los costos corresponden a valores de referencia para 10 m² de cada solución construidos en Montevideo, Uruguay.

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para fachadas; en la tabla 2, los correspondientes a divisorios verticales; en la tabla 3, los valores para divisorios horizontales (entrepisos) y en la tabla 4, los valores para entrepisos en el caso particular de que se empleen pisos flotantes.

Nota: La versión original de este artículo incluía precios de referencia a junio de 2010; éstos se han actualizado a junio 2022 en base a diferentes tablas de referencia y paramétricas publicadas (Seré Carracedo, 2020; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2022a y 2022b).

Tabla 1. Valores de índice de reducción acústica compensado R_w y costo de 10 m² para distintas fachadas

Material	Costo/10 m ² (US\$)	R_w (dB)	Costo específico cada 10 m ² (US\$/dB)
Ladrillo autoportante	455	44	10,3
Pantalla H.A.* 10 cm	1510	43	35,1
H.A. 14 cm	2114	43	49,2

* H.A.= Hormigón armado

Fuente: Elaboración propia, con datos de R_w tomados de Méndez et al. (1994) y costos estimados a junio de 2022

Tabla 2. Valores de índice de reducción acústica compensado y costo de 10 m² para distintos tabiques divisorios verticales

	R _w (dB)	Aplicaciones recomendadas (según Méndez et al., 1994)	Costo (US\$/10 m ²)	Costo específico cada 10 m ² (US\$/dB)
Ticholo 11 cm	40	Tabiques internos, muros internos	306	7,7
Ladrillo común	50	Todas	455	9,1
Placas de yeso	43	Tabiques internos, muros internos	340	7,9
Ticholo 18 cm	44	Todas, menos linderos con edificios vecinos	459	10,4
Ladrillo común 27 cm	54	Todas	650	12,0
H.A.	50	Todas	1812	36,2

Fuente: Elaboración propia, con datos de R_w tomados de Méndez et al. (1994) y costos estimados a junio de 2022

Tabla 3. Valores de índice de reducción del ruido de impacto compensado ΔN_w y costo de 10 m² para distintos divisorios horizontales (entrepisos)

	Costo/10 m ² (US\$)	ΔN _w (dB)	Costo específico cada 10 m ² US\$/dB
Losa con cerámica	2108	66	31,9
Losa con cerámica (otra)	1979	71	27,9
Losa con vinílico	2029	71	28,6
Losa con alfombra	1884	52	36,2

Fuente: Elaboración propia, con datos de ΔN_w tomados de Méndez et al. (1994) y costos estimados a junio de 2022

En la Figura 1 se puede observar que el aislamiento no varía significativamente, aunque los costos lleguen a tener un orden de diferencia. En particular, en este caso el material de costo menor es el que tiene mejor y más eficiente desempeño acústico.

Tabla 4. Valores de índice de reducción del ruido de impacto compensado ΔN_w y costo de 10 m² para distintos entrepisos con piso flotante

	Costo (US\$/10m ²)	ΔN _w (dB)	Costo específico cada 10 m ² US\$/dB
Piso flotante	766	35	21,9
Piso flotante y vinílico	983	39	25,2
Piso flotante y alfombra	838	41	20,4
Piso flotante y goma	1106	49	22,6

Fuente: Elaboración propia, con datos de ΔN_w tomados de Méndez et al. (1994) y costos estimados a junio de 2022

Trabajando ahora sobre tabiques divisorios verticales, se obtienen los costos unitarios y específicos a R_w que se presentan en la tabla 2 y en las Figuras 2 y 3. Los valores de R_w están tomados de Méndez et al. (1994). Puede verse que la variación en el costo específico de tabiquería interior es mucho menor que en los demás casos. Para muros verticales, las soluciones más eficientes acústicamente son las que corresponden a

muros de ladrillo, que son también soluciones de bajo costo.

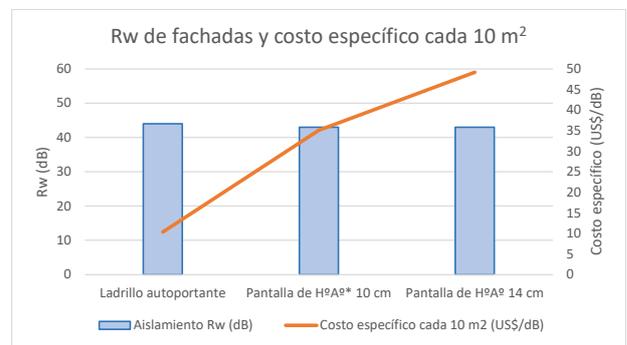


Figura 1. Índice de reducción acústica compensado R_w para fachadas y costo específico de 10 m²

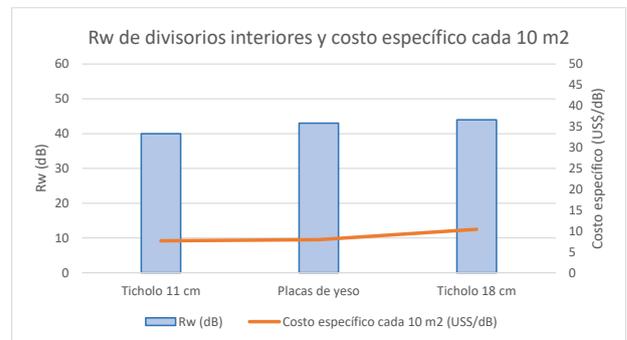


Figura 2. Índice de reducción acústica compensado R_w para tabiques interiores y costo específico de 10 m²



Figura 3. Índice de reducción acústica compensado R_w para muros divisorios y costo específico de 10 m²

En el caso del aislamiento de entrepisos, el desempeño acústico es muy variable. Obsérvese (tabla 3, figura 4) que la solución con peor desempeño acústico (losa con alfombra) si bien está entre las de menor costo, es la más ineficiente desde el punto de vista de su costo específico, en tanto la mejor solución en cuanto a desempeño y eficiencia (losa con vinílico) resulta ser la más económica.

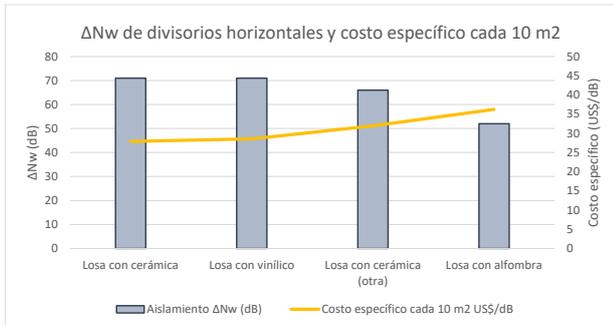


Figura 4. Índice de reducción del ruido de impacto compensado ΔN_w para divisorios horizontales y costo específico de 10 m²

En el caso de soluciones para entrepisos con pisos flotantes, considerando el aislamiento al ruido de impacto cuantificado como ΔN_w , en la medida que se incrementa el costo de la solución también se obtiene una mejora significativa desde el punto de vista del desempeño acústico, como se observa en la tabla 4 y la Figura 5.

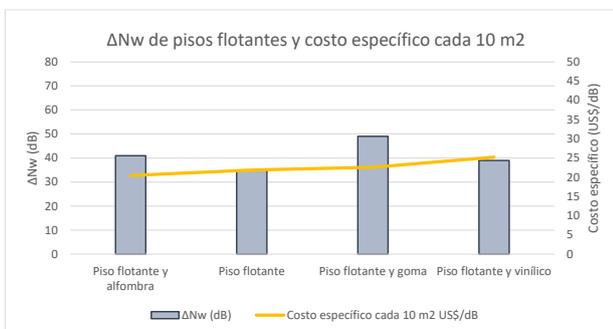


Figura 5. Índice de reducción del ruido de impacto compensado ΔN_w para divisorios horizontales con piso flotante y costo específico de 10 m²

7. CALIDAD ACÚSTICA DE AULAS

En un aula hay tres parámetros que son claves en su aptitud como tal, es decir, en su calidad: la inteligibilidad, el tiempo de reverberación y el aislamiento a ruidos exteriores. La relación existente entre la inteligibilidad en una sala y su tiempo de reverberación es determinante de la calidad acústica de la misma.

La acústica de las aulas es determinante en la calidad del aprendizaje. Gonzalo et al. (2001) citan a Miyara,

que expresa: “Existen investigaciones que muestran que en aulas expuestas a mayor ruido el rendimiento escolar medido con pruebas estándar es peor que en el caso de aulas interiores acústicamente más protegidas”.

Los citados autores, a su vez, indican:

Los ruidos y la reverberación excesiva atentan también contra el nivel de inteligibilidad de la palabra hablada, produciendo interferencias en la comunicación, alteración de la concentración, agotamiento físico y mental y otros inconvenientes negativos para un alto rendimiento académico de profesores y alumnos (2001).

Pese a que la problemática que rodea a la calidad acústica de aulas es conocida, son múltiples las referencias que se pueden hallar a propósito de aulas acústicamente deficitarias. En efecto, dice el especialista mexicano S. Beristáin (1998): “...en los países hispanoamericanos (...) por lo general, ninguna escuela ha sido diseñada acústicamente, por razones de ignorancia, presupuesto o apatía...”

Vela et al. (1997) estudian las aulas en la Universidad Pública de Navarra, España, y concluyen que en general las condiciones acústicas son inadecuadas: los tiempos de reverberación superan los óptimos recomendados para aulas, el aislamiento acústico de las particiones resultó adecuado sólo en 4 de las 20 que fueron estudiadas, y el índice RASTI resultó entre pobre y regular en todos los casos. Resultados similares son obtenidos en Brasil en 1998 por Bordinhao et al. (1998) al estudiar la calidad acústica de las aulas del Centro de Tecnología de la Universidad Federal de Santa María, y por Urea y Rolla Bertoli [5] al hacerlo en aulas de escuelas de la red estadual de Campinas, San Pablo.

Díaz Sanchidrián y Pedrero González (1998) estudian la inteligibilidad de la palabra en aulas de centros de enseñanza próximos al aeropuerto de Madrid-Barajas, España. Para ello realizan determinaciones de niveles sonoros, tiempos de reverberación, aislamiento acústico, SIL e índice RASTI. Concluyen que el aislamiento a ruido aéreo de las fachadas es deficiente, lo que empeora la ya de por sí pobre inteligibilidad de las aulas.

8. CASO DE ESTUDIO: CALIDAD ACÚSTICA DE AULAS EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UDELAR (URUGUAY)

En 2002, Broggi et al. realizaron un estudio de calidad acústica de aulas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, orientado especialmente a la determinación de los tiempos de reverberación en

diferentes tipologías de locales. Las determinaciones se realizaron experimentalmente.

Nota: Corresponde hacer constar que un estudio similar se realizó en 2015 (Gianoli et al., 2015), pero con una metodología experimental totalmente diferente: la fuente de ruido rosa empleada fue la explosión de globos de látex y el tiempo de reverberación se determinó por medición directa, empleando el módulo que a tal efecto se ha incorporado al sonómetro Brüel & Kjær modelo 2250 del DLA-IMFLA. Sólo 6 de las aulas medidas en 2002 se volvió a medir en 2015, y la mayor parte de ellas habían tenido alguna modificación, como cambio de puerta ciega por puerta vidriada o cambio de mobiliario. Tres de las seis aulas arrojaron nuevamente el mismo tiempo de reverberación; en los otros casos, los nuevos tiempos de reverberación resultaron ser inferiores a los medidos en 2002.

8.1 Metodología aplicada

Se seleccionaron 14 salones, que cubrían en principio las diferentes tipologías de aulas con que en ese momento contaba la Facultad de Ingeniería. Los salones 002, 301 y 401 tienen características de pequeños anfiteatros con piso y butacas de madera, en tanto el Salón de Actos es efectivamente un anfiteatro equipado con butacas tapizadas en tela, que cuenta con cierto nivel de tratamiento acústico (paneles) en muros y techo. Los restantes salones, más allá de particularidades, tienen paredes y techo de hormigón pintado y piso de baldosas.

Al momento en que se realizaron las mediciones, las puertas de las aulas eran de madera ciega, a excepción del salón 031, cuya puerta era metálica vidriada. Los asientos eran pupitres de madera, excepto en el salón 031 en que los pupitres eran de cármica. El salón 107

tenía un sistema de amplificación que se empleaba durante el dictado de las clases teóricas.

Primeramente se tomó en gabinete la información acerca de cada local a ensayar (dimensiones, capacidad, terminaciones, equipamiento), y luego se determinaron sus características acústicas en condiciones de escasa o nula actividad en los corredores y salones adyacentes. Para ello, en cada local se realizó una grabación digital del ruido de fondo midiendo simultáneamente los niveles sonoros, y luego se determinó el tiempo de reverberación empleando una señal de ruido rosa pregrabada.

Se tomaron no menos de tres mediciones en cada salón. En cada punto se verificaba que los niveles sonoros se hubieran estabilizado en un nivel de por lo menos 80 dB con ponderación A, y luego se cortaba abruptamente la señal sin interrumpir la grabación. A partir del descenso de los niveles sonoros en la sala y mediante procesamiento informático de las grabaciones, se pudo determinar el tiempo de reverberación en cada caso.

Los niveles de ruido de fondo se midieron en condiciones con puertas abiertas y cerradas; los valores obtenidos oscilaron entre L_{AF} 40 dB y 74 dB, con niveles equivalentes $L_{AF,eq}$ entre 53 dB y 61 dB, variación fuertemente influenciada por la cantidad de personas en el exterior inmediato del aula durante las mediciones.

En la tabla 5 se resumen los datos básicos de cada aula estudiada, los valores promedio obtenidos para el tiempo de reverberación medido con el aula desocupada, y los valores calculados para porcentajes de ocupación del 75 % y del 100 %.

Tabla 5. Características de las aulas incluidas en el estudio

Salón	DATOS GEOMÉTRICOS				N° de asientos en el salón	T_R a 500 Hz (s)		
	Área de piso (m ²)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Superficie lateral interior (m ²)		Valor medido (salón desocupado)	Valor estimado según % ocupación	
							100 %	75 %
002	64,0	3,31	211,7	233,8	40	1,4	0,9	1,0
006	55,3	3,17	175,2	204,8	60	2,3	0,9	1,1
007	53,8	3,17	170,5	200,6	50	2,8	1,1	1,3
008	48,1	3,17	150,5	177,6	50	2,2	0,9	1,1
009	51,7	3,17	161,7	198,2	40	1,7	0,9	1,0
010	79,67	2,00	159,3	239,8	40	1,7	0,9	1,0
011	79,7	2,72	216,7	268,8	60	1,8	0,9	1,0
031	49,2	3,74	183,9	217,3	50	2,5	1,1	1,3
101	88,5	3,37	298,4	304,9	70	2,3	1,0	1,2
107	162,8	3,37	548,5	458,0	120	2,7	1,2	1,4
112	48,1	3,37	162,2	179,4	40	2,0	0,9	1,1
301	99,0	4,10	342,1	267,8	110	2,4	0,9	1,1
401	99,0	4,10	342,1	267,8	80	1,9	1,0	1,1
Actos	258,5	6,50	1628,2	929,0	155	0,8	0,6	0,7

8.2 Evaluación de la calidad acústica de las aulas consideradas

A excepción del salón de actos, los tiempos de reverberación obtenidos son más elevados que los recomendados, aún si se consideran los que resultan con un 100 % de ocupación (máxima absorción, caso más favorable) (Broggi et al., 2002).

Los valores obtenidos para los niveles de ruido de fondo son francamente más elevados que los recomendados para aulas, que se sitúan entre 38 dB y 42 dB con ponderación frecuencial A (Ministerio de Vivienda, España, 2009; Carrión Isbert, 1998).

La concurrencia de ambos factores da por resultado una calidad acústica deficiente en las aulas estudiadas, que muy probablemente presenten problemas de inteligibilidad de la palabra hablada, lo que no ha sido valorado en forma explícita en esta oportunidad.

8.3 Propuestas

A los efectos de bajar los tiempos de reverberación en las aulas estudiadas que así lo requieren, se analizaron, a modo indicativo, tres alternativas consistentes en colocar diferentes materiales absorbentes que se comercializaban en plaza (alfombra de alto tránsito y lana de vidrio de dos espesores diferentes). Para cada uno de ellos, se calculó la cantidad de material necesario para llevar el tiempo de reverberación existente al valor deseado en función de su coeficiente de absorción y del valor medido de TR, y luego se compararon los costos asociados con cada intervención.

Nota: Se omite la tabla comparativa pues los precios estaban calculados a valores de 2010.

Los resultados mostraron que la solución más económica no es la misma en todos los casos, más allá de que, si se planteara realizar una intervención para bajar los TR de las aulas, la mejor decisión probablemente fuera adoptar una única modalidad de tratamiento en todos los casos, por facilidad de implementación y por economía de escala.

Debido a que la calidad de la construcción de la Facultad de Ingeniería es muy buena, no se plantean soluciones para mejorar el aislamiento acústico de las aulas; se entiende que, para bajar el ruido de fondo en las aulas, la medida idónea es de gestión, en cuanto a la permanencia de estudiantes en el exterior inmediato de ellas cuando en su interior se están dictando clases.

9. SÍNTESIS FINAL

La calidad acústica no suele ser tomada explícitamente en cuenta en el diseño y construcción de muchos tipos

de locales, entre ellos los destinados a fines educativos. Resultados deficientes en materia de acústica de aulas pueden encontrarse en diferentes países, en locales para diferentes niveles educativos, y aun en edificios con calidad constructiva buena o muy buena. Esto incide en la calidad de la enseñanza y en el proceso de aprendizaje de los estudiantes, que resultan ser más pobres que los que se obtienen en locales que no padecen estas deficiencias.

Los costos de las soluciones con mejor desempeño acústico no suelen ser las más onerosas y su incidencia en el costo total de la construcción no es, por lo general, decisivo en cuanto a la alternativa a adoptar. Sin embargo, pueden significar una mejora sustantiva en la calidad de la edificación, desde el punto de vista de la aptitud del local en cuestión para el uso para el que ha sido diseñado.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al Prof. Ing. Carlos Echeverri Londoño la oportunidad de participar como disertante en este evento.

REFERENCIAS

- Aulestia Valencia, C. *Estudio del estado acústico de dos iglesias patrimoniales de Quito (La Catedral y La Compañía de Jesús)*, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 2010.
- Beránek. L.L. Balanced noise-criterion (NCB) curves. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 86, Issue 2, pp. 650-664, aug. 1989.
- Beristáin, S. (1998). “El ruido es un serio contaminante”, en *Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica – I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica do Mervosul – 18º Encontro da SOBRAC*, Florianópolis, Brasil, 1998, pp. 135-142.
- Bordinhao de Matos, J.; Lopes Machado, V.A.; Pizzutti dos Santos, J.C.; Pizzutti dos Santos, J.L. (1998). “Conforto Ambiental no centro de tecnologia da Universidades Federal de Santa Maria”, en *Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica – I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica do Mervosul – 18º Encontro da SOBRAC*, Florianópolis, Brasil, 1998, pp. 487-490.
- Broggi, G.; Chao R.; González, E. *Evaluación de la calidad acústica de las aulas de Facultad de Ingeniería, Universidad de la República*, Montevideo, Uruguay, 2002, 12 pp.
- Carrión Isbert, A. *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*, Edicions de la Universitat Politècnica

- de Catalunya, España, 423 pp., 1998. ISBN 84-8301-252-9.
- Díaz Sanchidrián, C.; Pedrero González, A. (1998). “Estudio de la inteligibilidad de la palabra en centros de enseñanza no universitaria situados en la proximidad del aeropuerto de Madrid – Barajas”, en *Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica – I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica do Mercosul – 18º Encontro da SOBRAC*, Florianópolis, Brasil, 1998, pp. 447-450.
- Gianoli Kovar, Pablo; Montero Croucciée, Joaquín; González, Alice Elizabeth. *Calidad Acústica de Aulas en la Facultad de Ingeniería (Udelar)*. XIII Congreso Argentino de Acústica, VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas, 10 pp. Buenos Aires, Argentina, 2015.
- González, A.E.; Indarte, E.; Lisboa, M. *Acústica Urbana. Módulo II. Manual de acondicionamiento acústico orientado a la gestión municipal*, 2008, 116 pp., ISBN 978-9974-7610-3-2.
- Gonzalo, G.E., Del Lungo; Palazzo. Centro Tecnológico Labein, *Parte 2ª: El Ruido y los Edificios: criterios acústicos en el diseño de centros docentes*, Jornadas sobre Criterios acústicos en el diseño de centros docentes, Vitoria, Bilbao, España, 2001, 64 pp.
- Gonzalo, G.E.; Del Lungo; Palazzo. “Inteligibilidad acústica de los ambientes, su influencia en la enseñanza de la música”. *Jornadas sobre Criterios acústicos en el diseño de centros docentes*, Centro Tecnológico Labein, Vitoria, Bilbao, España, 2001.
- Kinsler, L.E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B.; Sanders, J.V. *Fundamentos de acústica*, Limusa, Grupo Noriega editores, México, 1992, 592 pp. ISBN 968-18-2026-6.
- Medina Valdéz, A. *La calidad acústica arquitectónica El ambiente acústico en edificios escolares de nivel superior*. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Profesional Tecamachalco, México, 2009, 143 pp.
- Méndez, A.M.; Stornini, A.J.; Salazar, E.B.; Giuliano, G.; Velis A.G.; Amarilla, B.C. *Acústica arquitectónica*, Universidad del Museo Social Argentino, Buenos Aires, Argentina, 1994, 238 pp. ISBN 950-99514-5-5.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2022 a). *Lista Oficial de Precios N° 555*, Marzo 2022.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2022b). *Valores base para la aplicación de la fórmula paramétrica*. Boletín N° 647, Mayo 2022.
- Ministerio de Vivienda. *Código Técnico de la Edificación. Documento básico HR Protección contra el ruido*, 2009, España, 90 pp.
- Querol i Noguera, J.M. *Manual de mesurament i avaluació del soroll*, Direcció General de Qualitat Ambiental, Generalitat de Catalunya, España, 1994, 132 pp. ISBN 84-393-3235-1.
- Seré Carracedo, Florencia (2020). *Costos de construcción habrían crecido por debajo de la inflación e inflación comienza a mostrar trayectoria al alza, impulsada por aumento de tipo de cambio*. En: *Novedades Económicas*, Cámara de la Construcción del Uruguay, abril 2020.
- Urea A.M. y Rolla Bertoli, S. “A acústica das salas de aula das escolas da rede estadual de Campinas – SP”, en: *Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica – I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica do Mercosul – 18º Encontro da SOBRAC*, Florianópolis, Brasil, 1998, pp.543-546.
- Vela, A.; Arana, M.; Sanmartín M.; Borrachina, M. (1997). “Condiciones acústicas de las aulas del aulaario de la Universidad Pública de Navarra”, en *Conferencias invitadas y Comunicaciones, XXVIII Jornadas Nacionales de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica*, Oviedo, España, 1997, pp. 99-102.