

ACÚSTICA APLICADA A LA EDIFICACIÓN.

**EVOLUCIÓN HISTÓRICA DESDE LA
ANTIGÜEDAD HASTA SU ACTUAL
INTEGRACIÓN EN LOS PROCESOS
CONSTRUCTIVOS.**



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA.
TRABAJO FIN DE GRADO. JULIO 2013.
ALUMNO: MARTÍN REDONDA FERNÁNDEZ.
TUTORA: LUISA MARÍA SEGADE ZAS.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE.

RESUMEN.

Este trabajo pretende ofrecer una amplia perspectiva de la acústica aplicada a la edificación cubriendo la gran mayoría de los diferentes ámbitos donde se conjugan aspectos y criterios acústicos y arquitectónicos. Para ello, he consultado las obras de autores expertos avalados por su experiencia y trayectoria profesional así como a diversos técnicos competentes y profesionales del sector. Como resultado, se exponen aspectos relativos a la evolución histórica de esta ciencia, sus fundamentos científicos, la normativa relacionada, la integración actual en un proyecto de edificación y finalmente se elabora un caso práctico de acondicionamiento acústico.

Palabras clave: Acústica, edificación, desarrollo histórico, proyecto, acondicionamiento.

ABSTRACT.

This work aims to provide a broad perspective of applied building acoustics, covering the vast majority of the different areas and aspects which combines acoustic and architectural criteria. For this, I have consulted the works by experts backed by experience and career as well as several competent technicians and professionals. As a result, this work exposes aspects of the historical development of this science, its scientific fundamentals, the related regulations, the current integration in a building project and finally, develops a case study of acoustic conditioning.

Key Words: Acoustics, building, historical development, project, conditioning.

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ACÚSTICA APLICADA A LA EDIFICACIÓN.....	15
1.1. Prehistoria y Antigüedad	15
1.2. Antigüedad clásica	17
1.2.1. El teatro en la Época Antigua	19
1.3. Edad Media	24
1.4. Renacimiento	25
1.5. Siglos XVII-XVIII.....	30
1.5.1. El teatro barroco y neoclásico	32
1.6. Mesoamérica.....	35
1.7. Arte Islámico	38
1.8. Siglos XIX-Actualidad.....	40
Bibliografía Capítulo 1	47
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA.....	51
2.1. El sonido	51
2.1.1. Generación y propagación del sonido.....	51
2.1.2. Caracterización del sonido	52
2.1.3. Nivel de presión sonora.....	53
2.1.3.1. Relación entre presión, potencia e intensidad	54
2.1.4. El decibelio. Clases y operaciones	55
2.1.4.1. Adición de niveles de presión sonora	56
2.1.4.2. Sustracción de niveles de presión sonora	56
2.1.5. Curvas isofónicas de igual sonoridad	57
2.2. El ruido	57
2.2.1. Tipos de ruido.....	59
2.2.1.1. Caracterización en frecuencia	59
2.2.1.2. Caracterización temporal.....	59
2.3. Descriptores acústicos, parámetros de confort acústico y factores de mérito de un recinto	60
2.3.1. Descriptores acústicos	60
2.3.1.1. Nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} y L_{Aeq}	60
2.3.1.2. Descriptores estadísticos.....	60
2.3.1.3. Nivel sonoro día-noche.....	61
2.3.1.4. Nivel de contaminación de ruido.....	61
2.3.1.5. Índice de ruido de tráfico	61
2.3.1.6. Nivel de exposición sonora.....	61
2.3.2. Parámetros de confort acústico y factores de mérito de un recinto.....	62
2.3.2.1. La inteligibilidad de la palabra	62
2.3.2.2. Criterios de confort acústico interior	63
2.3.2.3. Otros parámetros acústicos y factores de mérito de un recinto.....	65
2.4. Instrumentación acústica.....	71
2.4.1. Instrumentos de medida	72
2.4.1.1. Sonómetro.....	72
2.4.1.2. Dosímetro.....	74

2.4.1.3. Espectrómetro	74
2.4.1.4. Calibrador	74
2.4.1.5. Analizador de Fourier (FFT).....	74
2.4.1.6. Registradores	74
2.5. Aislamiento acústico y acondicionamiento acústico.....	75
2.5.1. Aislamiento acústico.....	76
2.5.1.1. Aislamiento acústico a ruido aéreo.....	76
2.5.1.2. Sistemas constructivos y aislamiento a ruido aéreo.....	77
2.5.1.3. Aislamiento a ruido de impacto.....	80
2.5.1.4. Transmisiones laterales.....	81
2.5.1.5. Materiales aislantes.....	82
2.5.2. Acondicionamiento acústico.....	83
2.5.2.1. Reverberación.....	83
2.5.2.2. Materiales absorbentes.....	84
Bibliografía Capítulo 2	85

CAPÍTULO 3. IMPORTANCIA ACTUAL DEL CONFORT ACÚSTICO Y DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO. NORMATIVA 89

3.1. Confort acústico y protección contra el ruido.....	89
3.1.1. Efectos del ruido en la salud.....	90
3.1.2. Control de los factores de riesgo implicados en la contaminación acústica.....	92
3.2. Normativa acústica en la edificación.....	93
3.2.1. Desarrollo histórico del marco legal.....	93
3.2.1.1. NBE-CA 88.....	94
3.2.2. Entorno legislativo actual.....	95
3.2.2.1. De la Directiva Europea 2002/49/CE a la Ley 37/2003 de Ruido.....	95
3.2.2.2. La Ley del Ruido y la Edificación.....	99
3.2.2.3. De la LOE al CTE.....	100
Bibliografía Capítulo 3	107

CAPÍTULO 4. INTEGRACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS. SOLUCIONES ACÚSTICAS..... 111

4.1. Procesos constructivos dentro del ámbito de aplicación del DB-HR	112
4.1.1. Aislamiento acústico.....	112
4.1.1.1. Zonificación del edificio.....	112
4.1.1.2. Definición de los elementos constructivos.....	115
4.1.1.3. Criterios y recomendaciones de diseño. Encuentros entre elementos constructivos.....	125
4.1.1.4. En obra.....	140
4.1.2. Acondicionamiento acústico.....	142
4.1.2.1. Identificación de los recintos.....	142
4.1.2.2. Determinación de las exigencias.....	142
4.1.2.3. Verificación de las exigencias.....	143
4.1.3. Ruido y vibraciones de las instalaciones.....	145
4.1.3.1. Encuentros entre elementos constructivos e instalaciones.....	146
4.1.3.2. Instalaciones en la cubierta del edificio.....	146
4.2. Rehabilitación acústica.....	146
4.2.1. Metodología general.....	148
4.2.2. Origen del ruido.....	148
4.2.2.1. Ruido procedente del exterior.....	149
4.2.2.2. Ruido procedente de zonas comunes.....	150

4.2.2.3. Ruido procedente de estancias contiguas.....	151
4.2.2.4. Ruido procedente del recinto superior.....	151
4.2.2.5. Ruido procedente de las instalaciones.....	152
4.3. Diseño acústico de espacios arquitectónicos singulares.....	153
4.3.1. Espacios comunitarios.....	154
4.3.1.1. Objetivos acústicos.....	154
4.3.1.2. Criterios de diseño.....	154
4.3.2. Teatros.....	156
4.3.2.1. Objetivos acústicos.....	156
4.3.2.2. Criterios de diseño.....	156
4.3.3. Salas de conciertos.....	158
4.3.3.1. Objetivos acústicos.....	158
4.3.3.2. Criterios de diseño.....	159
Bibliografía Capítulo 4.....	163

CAPÍTULO 5. CASO PRÁCTICO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE UN RECINTO..... 167

5.1. Memoria.....	167
5.1.1. Memoria descriptiva.....	167
5.1.1.1. Descripción del proyecto.....	167
5.1.2. Memoria constructiva.....	169
5.1.2.1. Sistema de acabados.....	169
5.1.3. Memoria de cálculo.....	173
5.2. Mediciones.....	176
5.3. Presupuesto.....	178
5.4. Documentación gráfica.....	180
Bibliografía Capítulo 5.....	183

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES..... 187

ANEXO A..... 193

FUENTE DE LAS IMÁGENES UTILIZADAS..... 203

BIBLIOGRAFÍA GENERAL..... 211

INTRODUCCIÓN.

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo ofrecer una visión global de la Acústica aplicada a la Edificación. Para ello, su contenido se articula en una serie de capítulos donde se pretende reunir y sintetizar todos los aspectos donde interactúan Acústica y Arquitectura.

En el Capítulo 1 se realiza un amplio recorrido cronológico a través de los diferentes períodos históricos donde se muestra la evolución de esta ciencia y su vinculación e influencia en el diseño de recintos. Pese a que la Acústica y los fenómenos relacionados con ella surgen como tal en el siglo VI a.C. gracias a las escuelas de pensamiento filosófico en Grecia, hay que avanzar hasta el siglo XIX para que las aportaciones de Lord Rayleigh y Wallace Clement Sabine sienten las bases de la Acústica Arquitectónica moderna. Aparte de los avances científicos, la historia nos muestra la influencia de actividades humanas como la música o la religión en el desarrollo de la Acústica, el cual no gozó siempre de una progresión, supeditado a épocas pobres en el desarrollo del conocimiento humano, la naturaleza interdisciplinar de la materia y las propias corrientes arquitectónicas de la época.

En el Capítulo 2 se exponen los fundamentos científicos relativos a la generación y propagación del sonido y otros conceptos teóricos utilizados en el estudio del ruido. Además, se realiza una compilación de los descriptores acústicos habituales en la definición de los requisitos acústicos exigidos a los edificios y se describen los instrumentos de medición de dichos descriptores.

El Capítulo 3 está dedicado a la importancia actual del confort acústico y en él se aborda la contaminación acústica y el marco legal que surge como consecuencia del problema del ruido. De este modo, se expone la normativa en Acústica para Edificación a través de un recorrido cronológico, que finaliza con la aprobación del Código Técnico de la Edificación y el Documento Básico de Protección frente al Ruido. Se especifican las diferencias con la normativa anterior y su relación e influencia con la Ley de Ordenación de la Edificación y la Ley de Ruido 37/2003, que conforman el marco legal actual en España.

En el Capítulo 4 se expone la metodología para integrar las exigencias acústicas determinadas por la normativa en un proyecto de edificación, así como una serie de recomendaciones tanto de diseño como de ejecución y control para su consecución. Se hace especial hincapié en la necesidad de la actuación en todas las fases del proceso constructivo para el cumplimiento de los objetivos establecidos. Fuera del ámbito de aplicación del Código Técnico de la Edificación, en el mismo capítulo también se describen de forma práctica criterios de diseño para espacios arquitectónicos como teatros y salas de conciertos; y el análisis y metodología a seguir en una rehabilitación acústica de carácter parcial.

El Capítulo 5 se dedica a la realización de un caso práctico de acondicionamiento acústico de un aula destinada a contenido audiovisual, que

permite dotar al mencionado recinto de unas condiciones acústicas acordes al uso al que se pretende destinar.

Finalmente, en el Capítulo 6 se exponen una serie de conclusiones acerca de todo el contenido del Trabajo Fin de Grado.

CAPÍTULO

1

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ACÚSTICA APLICADA A LA EDIFICACIÓN.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 1.1. **PREHISTORIA Y ANTIGÜEDAD.**
- 1.2. **ANTIGÜEDAD CLÁSICA.**
 - 1.2.1. EL TEATRO EN LA ÉPOCA ANTIGUA.
- 1.3. **EDAD MEDIA.**
- 1.4. **RENACIMIENTO.**
- 1.5. **SIGLOS XVII-XVIII**
 - 1.5.1. EL TEATRO BARROCO Y NEOCLÁSICO.
- 1.6. **MESOAMÉRICA.**
- 1.7. **ARTE ISLÁMICO.**
- 1.8. **SIGLOS XIX-ACTUALIDAD.**

CAPÍTULO 1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ACÚSTICA APLICADA A LA EDIFICACIÓN.

Este capítulo describe la evolución de la Acústica aplicada a la edificación a lo largo de los diferentes períodos históricos, desde las primeras observaciones e interpretaciones del sonido por parte de las civilizaciones antiguas, hasta los grandes avances de los siglos XIX y XX que permitieron evaluar la calidad acústica de los recintos de forma científica y que dieron lugar a la Acústica Arquitectónica tal y como la conocemos hoy en día.

1.1. PREHISTORIA Y ANTIGÜEDAD.

El desarrollo de la especie humana está íntimamente relacionado con su capacidad para emitir y percibir sonidos. Dichos sonidos contienen información y producen sensaciones, satisfactorias o incómodas, que condicionan el comportamiento del ser humano. Ligado a este concepto, el nacimiento de la música supone el punto de partida del estudio del sonido. La evolución de la música supuso una vía de transmisión para que los estudiosos de la época avanzaran en sus conocimientos de acústica (Long, 2005).

Una primera aproximación a la Acústica Arquitectónica se encontró en **Hipogeo de Paola** (Malta). Un hipogeo es el nombre dado a un conjunto de cámaras sepulcrales excavadas en roca que han sido utilizadas por varias sociedades a lo largo del tiempo.



Fig. 1.1. Una de las salas del Hipogeo de Paola



Fig. 1.2. Abertura en la Sala del Oráculo

Este hipogeo es el único templo subterráneo prehistórico en el mundo. La enorme estructura fue excavada hacia el año 2500 a.C. y está formada por bloques colosales de caliza coralina levantados con aparejos ciclópeos. Probablemente se destinó en un inicio a ser utilizado como santuario para posteriormente convertirse en una necrópolis. El complejo, de unos 500 m², lo

forman un total de 29 salas comunicadas por pasadizos (ver fig. 1.1) y se estructura en tres niveles de profundidad, estando el nivel inferior a 10,6 m de profundidad con respecto al nivel de la calle.

Tiene especial importancia la Sala del Oráculo, de forma aproximadamente rectangular y situada en el segundo nivel de profundidad. Esta sala tiene una pequeña abertura (ver fig. 1.2) que comunica con una cámara lateral más pequeña. A través de este orificio el oráculo se comunicaba con las personas, prediciéndoles el futuro. La voz del oráculo sufría un efecto de amplificación sonora quedando de manifiesto las tradiciones chamánicas y el culto a los muertos existentes en la Prehistoria.

La sala tiene una fuerte resonancia acústica y el sonido se esparce por todo el complejo debido a que sólo hay piedra y no hay nada que lo absorba significativamente.

En **Egipto** el hombre empezó a adquirir conocimientos acerca de la acústica a través de la música, la cual se practicaba en su mayoría en los templos en actividades ceremoniales. Para ello, los egipcios utilizaban la flauta recta hecha de caña, trompetas de cobre o plata, arpas y el sistro, instrumento de percusión con un marco de madera y barras cruzadas que sostenían unas placas metálicas. La relación de hombre con la música queda plasmada, por ejemplo, en las pinturas de la tumba de Nakht (ver fig. 1.3) de la necrópolis de Tebas (siglo XIII a.C.)



Fig. 1.3. Pinturas de la tumba de Nakht

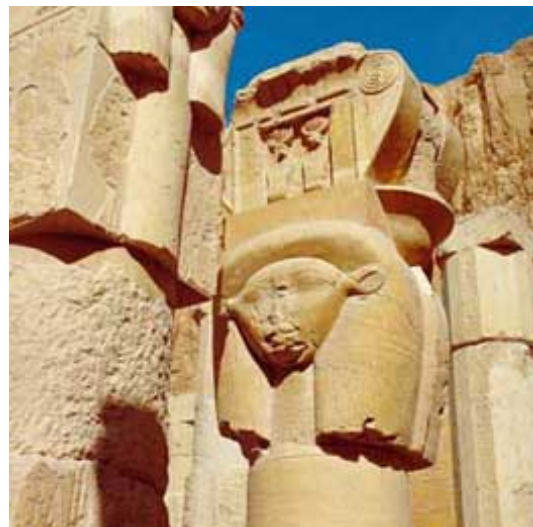


Fig. 1.4. Capitel de columna en forma de sistro

Esta relación está presente también en el **Templo de Hatshepsut (Deir el-Bahari)** construido hacia el año 1470 a.C. Tiene un santuario en el extremo sur donde los capiteles de las columnas que son reproducciones de sistros (ver fig. 1.4). Se cree que el sonido de este instrumento agradaba a los dioses y alejaba a los malos espíritus.

Se han encontrado en diferentes templos egipcios, por ejemplo en el **Templo de Dendera** (1500 a.C.), vasijas de alabastro que los sabios sacerdotes utilizaban para crear un campo armónico-energético propio para el desarrollo de actividades ceremoniales. Se hacía vibrar la vasija en diferentes cámaras del templo y, de acuerdo a la nota musical con la que vibraba la vasija, al recinto se le asignaba un color, una ecuación matemática y un diseño arquitectónico.

Se encuentran pruebas de que el hombre ya podía tener en cuenta que las disposiciones de ciertos elementos tenían influencia en el comportamiento acústico de los recintos en el **Antiguo Testamento**, donde se describen los tabernáculos (santuarios móviles construidos por los Israelitas) además de los adornos y los objetos rituales de los que constaban. En el Éxodo, 26 (1250 a.C.) se detallan las medidas de las cortinas de pelo de cabra que debían cubrir el tabernáculo, las cuales excedían ampliamente de las de éste, dando lugar a numerosos y amplios pliegues. Esta disposición es muy semejante a la que se realiza para la instalación de materiales aislantes en las particiones verticales de los estudios de grabación actuales.

1.2. ANTIGÜEDAD CLÁSICA.

Durante este periodo, el nacimiento de la cultura teatral marca los avances alcanzados en la acústica arquitectónica. El estudio de todo lo relacionado con el sonido fue fruto del afán por conseguir una acústica óptima en los recintos teatrales, tanto en Grecia como en Roma. Cabe destacar que los sabios romanos a diferencia de los griegos, que enfatizaban sus estudios en torno a las leyes que rigen la naturaleza, estudiaban los fenómenos relacionados con el sonido con una visión más técnica y pragmática.

Fruto del análisis de las principales poesías épicas griegas, la *Ilíada* y la *Odisea* de Homero, cuya composición según la opinión mayoritaria se realizó en el siglo VIII a.C., diversos autores llegaron a la conclusión de que Homero era conocedor de conceptos tales como eco, intensidad, tono o timbre de un sonido. El autor menciona estos fenómenos y conceptos en el desarrollo de la trama de las obras, como se puede apreciar en estos fragmentos de la *Ilíada*:

“Esténtor tenía una voz tan poderosa como 50 hombres juntos”. “El feroz Ares prorrumpió en un grito tan fuerte como el clamor de diez mil guerreros en refriega...”

Hoy en día es un arcaísmo pero la palabra “estentóreo” definió antiguamente a voces muy fuertes, ruidosas o retumbantes.

En Grecia se inician los estudios específicos de los fenómenos asociados con el sonido por parte del que se considera el primer matemático puro: **Pitágoras** (570 a.C.-497 a.C.). Pitágoras y sus discípulos en el siglo VI a.C. observaron que el ruido al golpear un yunque con un martillo variaba de tono en función de la masa del martillo. De esta forma se descubre la frecuencia natural de los objetos. Establecieron también una relación entre el tono del sonido que produce una cuerda vibrante y el inverso de la longitud de la misma y aunque

no se le atribuye directamente a Pitágoras, dos de sus discípulos, Arquitas de Tarento y Eudoxio de Cnidas explicaron, en términos cualitativos, la relación existente entre el tono del sonido producido y la frecuencia de vibración de la cuerda. Decían que las relaciones de consonancia en la vibración de dos cuerdas se podían expresar como cocientes entre números, representando estos cocientes los movimientos de las cuerdas. A un tono agudo le correspondía una velocidad mayor, al moverse más rápidamente el aire en contacto con la cuerda. Si esta velocidad resultase tener un valor bajo, daría lugar a un cociente menor y en consecuencia, a un tono más grave. Esta relación se establecería en el siglo XVIII.

Herodoto (484 a.C.-425 a.C.) diseña un primitivo transductor de vibración y además, surgen en esta época los primeros intentos de explicar el proceso de audición, dentro de las limitaciones que suponían los conocimientos que se tenían por aquel entonces, tanto de anatomía como del fenómeno del sonido. **Platón** (427 a.C.-347 a.C.) afirmaba que la vibración del aire llega a los oídos, transmitiéndose del propio aire al cerebro o la sangre.

En los años siguientes destacan las figuras de **Aristóteles** (384 a.C.-322 a.C.) y sus discípulos. El gran filósofo griego escribe en el siglo IV a.C. "Leyes del movimiento" y "Libro sobre Acústica" donde estudió el fenómeno natural del eco, atribuyéndolo a la reflexión del sonido. En relación a lo comentado en la etapa anterior en el libro del Éxodo en la "Problemata" de Aristóteles se encuentra otra referencia a la preocupación del hombre por la acústica de los recintos. En el Libro XI, 25 de esta obra el autor se formula la siguiente pregunta: *"¿Por qué cuando se extiende paja sobre la orquesta de un teatro, el coro parece menos sonoro? ¿Es a causa de la rugosidad relativa producida por la paja, que la voz no encuentra el suelo suave y uniforme cuando llega hasta él, y en consecuencia pierde volumen a causa de las discontinuidades?"*

Aristóteles, además del mencionado fenómeno del eco, en sus estudios sobre acústica postuló que el sonido no se propaga en el vacío y señalaba una posible dependencia de la velocidad de propagación del sonido con el tono emitido, afirmación que no se ajusta a la realidad y de interpretación equívoca. Fue un discípulo suyo, **Teofrasto de Eresos** el que afirmó que si dos sonidos en consonancia se emiten al mismo tiempo, si el receptor los percibe también en consonancia es porque se han desplazado a la misma velocidad, llegando al mismo tiempo. No será hasta el siglo XIX, por mediación de **J.H Hassenfratz** cuando se compruebe experimentalmente esta afirmación.

Euclides (325 a.C.-265 a.C.) en el siglo IV a.C. construyó un péndulo medidor de vibraciones apoyado en los estudios de su contemporáneo **Alejandro de Afrodísias**, sobre la energía cinética y la energía potencial.

En el siglo III a.C. se sientan las bases de la Acústica Geométrica, ligadas estrechamente a fenómenos ópticos. **Arquímedes** de Siracusa (287 a.C.-212 a.C.) uno de los científicos más importantes de la Antigüedad Clásica determinó el valor de la superficie esférica estableciendo como valor de $\pi = 22/7$ y sentó las bases de la "Ley de la inversa de los cuadrados" para

fenómenos ondulatorios (sonido y luz). Un siglo más tarde los estudios de **Herón** de Alejandría indicaban que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido es igual al ángulo de reflexión.

1.2.1. EL TEATRO EN LA ÉPOCA ANTIGUA.

La evolución de los descubrimientos y conocimientos en torno a la acústica derivaron en la aplicación de esta disciplina a la arquitectura en el diseño y puesta en escena del **Teatro de la Antigua Grecia**. La cultura teatral florece en esta época entre 550 a.C. y 220 a.C. En un inicio, las representaciones se realizaban en lugares abiertos cerca del altar del dios al que le rendían homenaje, Dada la popularidad que gozaban los teatros se fueron introduciendo graderíos para los espectadores, al principio construidas en madera que posteriormente fueron sustituidas por sólidas gradas de tierra para evitar los problemas de desprendimientos.

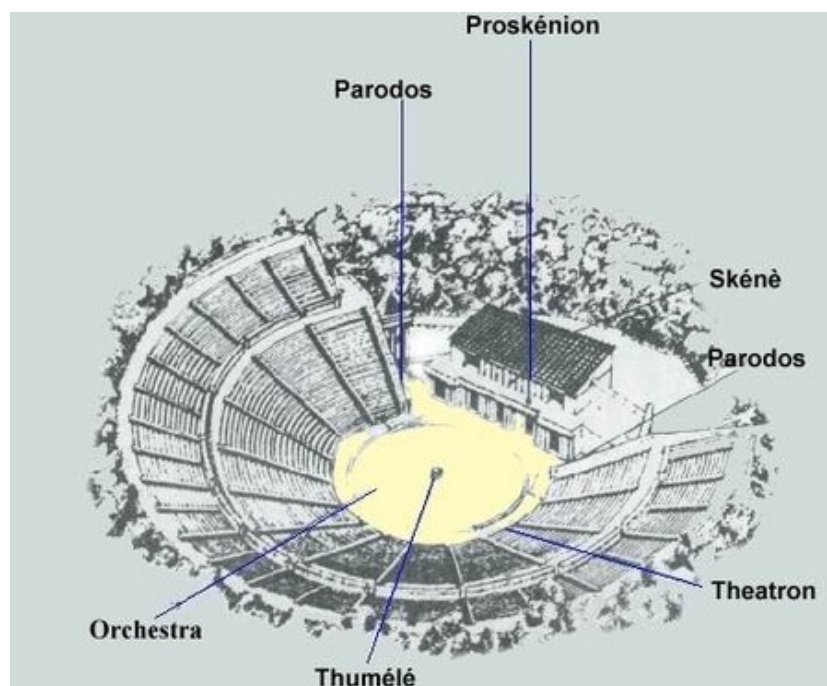


Fig. 1.5. Partes de un Teatro Griego

Los teatros griegos constaban de las siguientes partes (ver fig. 1.5):

Koilon: Conjunto de gradas destinadas a los espectadores y que ocupaba la ladera de una montaña. Su forma era perfectamente semicircular y los asientos se organizaban en gradas divididas sectores a las que se accedía por escaleras y pasillos. También recibió el nombre de *theatron* (lugar del que se mira).

Orchestra: Plataforma de forma circular situada en un lugar llano al pie del *koilon*, en ocasiones se adentraba en este hasta ocupar 1/7 de su diámetro.

Skené: Plataforma estrecha y alargada situada junto a la *orchestra*, en el lado opuesto al *koilon*. Se empezó a integrar en los teatros cuando las obras contaban con una cierta complejidad y empezó a haber actores y argumento.

Parodos: Cada uno de los pasajes de acceso para los espectadores situados a los extremos de la *orchestra*.

Thumélé: Altar situado en el centro de la *orchestra*.

Proskénion: Lugar adornado con numerosas columnas y estatuas donde actuaban los actores y similar al proscenio actual.

La razón de la concreta construcción y localización de los teatros griegos responde a su criterio de mantener los conceptos de audición y visibilidad íntimamente ligados, de ahí la construcción semicircular en depresiones del terreno, aprovechando su pendiente natural (Long, 2005).



Fig. 1.6. Vista del Teatro de Epidauro

El **Teatro de Epidauro** (330 a.C.) construido en honor al dios Dionisio, es el teatro más grande del mundo occidental y poseía el diseño acústico más avanzado. Su construcción es obra del arquitecto **Policleto el Joven** que escogió un terreno para su asentamiento de forma cóncava y orientado al Oeste, para que el sol naciente iluminase el escenario y el paisaje existente alrededor.

En la excavación del terreno se colocaron bloques de piedra caliza que conformaban las gradas que daban cabida a 14.000 espectadores (ver fig. 1.6 y fig. 1.7). Las representaciones se escuchaban de forma nítida en la última fila del graderío, situada a 70 m. de la representación, sin más ayuda para

amplificar la voz que las máscaras que portaban los actores. La investigación realizada en el año 2007 por el experto en acústica Nico Declerq y la ingeniera Cindy Dekeyser explica este fenómeno. El diseño de las gradas, que cubren las enormes dimensiones de la excavación formando una superficie perfectamente acanalada, con una total ausencia de superficies planas. La voz emitida por los actores choca contra las gradas se refleja en todas las direcciones, reforzando el sonido original, lo que supone un sofisticado filtro acústico, capaz de transmitir el sonido que viene del escenario a altas frecuencias y hacer de difusor a las bajas frecuencias (componente principal del ruido de fondo: murmullos del público...). El experimento se realizó mediante simulaciones en las que se comprobó que las frecuencias hasta 500 Hz disminuían mientras que las que superaban este valor resonaban entre las filas de las gradas.

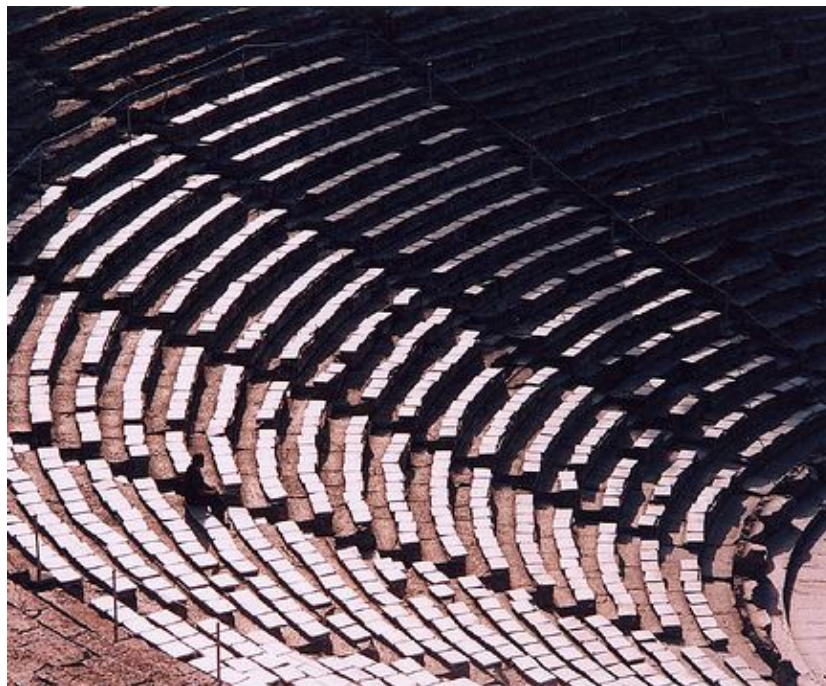


Fig. 1.7. Vista de las gradas del Teatro de Epidauro

La tipología de los teatros griegos se recoge en los **teatros romanos** (ver fig. 1.8) que derivaron, años más tarde en los anfiteatros cuyo diseño responde al acoplamiento de dos teatros.

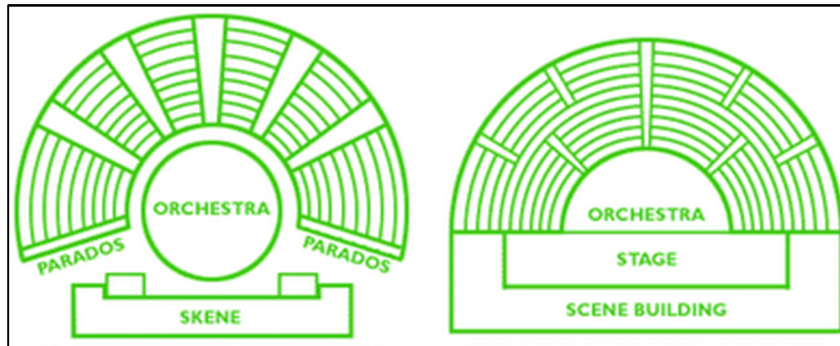


Fig. 1.8. Teatro griego (izq.) y teatro romano (der.)

En la época romana, Lucrecio y Vitrubio (s. I a.C.) sintetizan la sabiduría de sus predecesores y la aplican en conceptos como la inteligibilidad y el diseño de los recintos para optimizar la calidad de las audiciones.

Lucrecio (99 a.C.-55 a.C.), poeta y filósofo romano, en alguno de sus textos define conceptos como reverberación, transmisión, difracción y aislamiento del sonido:

“En los lugares solitarios, las grandes paredes de roca nos devuelven las palabras, así abofetean colina tras colina y se repite la reverberación. La distribución de voces se asemeja a una chispa de fuego que a menudo golpea al propio fuego que la produjo y arde de nuevo. Por lo tanto, el espacio se llena de voces completamente, todo alrededor bulle y se excita con el sonido”.

“Todas las imágenes luminosas siguen un camino recto hacia delante una vez que se producen; aunque ninguno puede verlas si se sitúa detrás de una pared, en cambio si que podrá oír las voces a través de ella. Pero aun cuando la voz sea capaz de superar la pared de una casa y penetrar en el oído, está embotada y confusa, y nos parece escuchar sonidos en vez de palabras.”

Fue **Vitruvio**, arquitecto, escritor e ingeniero el que elaboró el tratado sobre arquitectura más antiguo que se conserva y el único de la Antigüedad Clásica, “De Architectura”, probablemente escrito entre los años 27 y 23 a.C., formado por 10 libros. Este tratado (ver fig. 1.9) se considera la aportación más importante a la Acústica Arquitectónica hasta la época dado el carácter intencionado y perfectamente estructurado de la obra. Vitruvio realizó en él un completo análisis de los teatros, por ejemplo, en el libro V, capítulo IV se puede leer:

“El techo del pórtico del teatro, que ha de estar sobre el graderío más alto debe llegar a nivel de la altura del escenario, porque de este modo la voz, al ascender, alcanzará el mismo nivel en lo más alto del graderío que en el techo del escenario; pues si no existiera esta igualdad, la voz se extinguiría al nivel que hubiera llegado primeramente”.

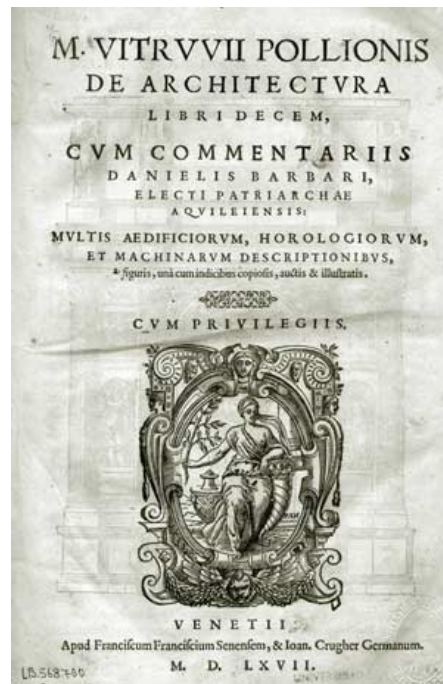


Fig. 1.9. "De Architectura" de Vitruvio

En el capítulo V analiza la distribución del sonido desde el escenario al graderío y propone colocar estratégicamente vasijas de bronce de dimensiones proporcionales a la de los teatros que actuarían como vasos de resonancia.

En el capítulo VIII del mismo libro, el autor realiza una clasificación de los sonidos, estableciendo lo siguiente:

Disonantes: *"donde al principio la voz se dirige hacia arriba, golpea contra los cuerpos sólidos de las alturas y es reflejado, interfiriendo en su caída con la ascensión de la siguiente palabra".* El concepto enunciado por Vitruvio tiene su correspondencia en el lenguaje habitual como las interferencias.

Circunsonantes: *"donde la voz se mueve en todas las direcciones y luego vuelve hacia el centro, donde se disuelve, haciendo confusos los finales de las frases, y se muere en sonidos sin sentidos."* Se corresponde con el término reverberación.

Resonantes: *"golpean contra los sólidos dando lugar a ecos y hacen que las palabras se oigan repetidas".* Sería el eco actual.

Consonantes: *"la voz se ve reforzada en todas sus características, y ésta alcanza los oídos de los espectadores clara y distinta".* Este concepto no tiene un equivalente directo en un término actual pero se cree que encarga el ideal acústico, la perfección.

Los estudios de Vitruvio acerca de la Acústica también supusieron avances en el campo militar, donde estableció criterios para el ajuste correcto de las

catapultas basándose en el sonido de que emitían los tirantes de cuerdas trenzadas cuando eran tensados.

Posteriormente **Lucio A. Séneca**, hace hincapié en un concepto relacionado con el sonido: el ruido. Muestra de ello es la epístola LVI a Lucilio, donde muestra su desencanto frente al molesto bullicio existente en Roma.

Claudio Ptolomeo en el siglo II, llega a la conclusión de que los sonidos se producen como consecuencia de los choques y del rápido movimiento vibratorio de las partículas. El autor recopila todos los conocimientos existentes relacionados con la Acústica en su texto “Armónicos”.

1.3. EDAD MEDIA.

En este período histórico, que abarca desde el final de imperio romano hasta el siglo XVI, el conocimiento científico queda en un segundo plano frente a la defensa del dogma religioso que reinaba en la Europa de la época. Destaca el filósofo romano **Boecio**, que, en el siglo VI, realiza una nueva recopilación de los conocimientos en Acústica, siguiendo con la actividad compendiadora realizada por Ptolomeo.

Con el cristianismo en pleno apogeo, se construyen monumentales **iglesias** dedicadas al culto religioso. Los primeros cristianos construyeron estos templos tomando como modelo la basílica romana, de armoniosas proporciones, techos de madera no excesivamente altos y ausencia de grandes paños de muros ciegos y desnudos, lo que proporcionaba unas condiciones acústicas aceptables y muy favorables para las principales preocupaciones de la época: propagar la fe y enseñanza de la religión cristiana (Long, 2005). Las iglesias, como elemento arquitectónico suponían un alarde de poder y objeto de culto, así como un reto para los constructores de la época.

A medida que avanzaban las técnicas constructivas se podían construir templos más grandes sin perder resistencia estructural, lo que conllevaba problemas acústicos. Como consecuencia de que el armazón de madera ardiera en muchas iglesias, se adoptó la bóveda pétreo para cubrirlas, con el fin de hacerlas más duraderas y resistentes contra el fuego. La sustitución de los techos planos de madera de las primeras basílicas cristianas (absorbentes, elásticos y difusores), por las bóvedas pétreas (reflectantes y focalizadoras), supuso un paso atrás en las condiciones acústicas de los templos. Por otra parte, al aumentar el volumen de las salas también aumentaron el retraso de las reflexiones llegando a tener un campo reverberante que contribuía a una pérdida importante de la inteligibilidad de la palabra.

El problema que ocasionaba la dificultad para entender el mensaje a causa de los sistemas constructivos utilizados en las iglesias motivó la aparición del canto gregoriano en el siglo IX. Tenía dos particularidades, se cantaba con las sílabas de las palabras muy espaciadas en el tiempo, de forma que se entendía en ese espacio tan reverberante y usa una relación tonal compuesta por 6 notas que, independientemente del orden en el que se sucedan, siempre

suenan armónicas (Navarro Casas y Sendra Salas, 1996.). Las iglesias posteriores situaron el coro en la nave central, de forma que las paredes cercanas ayudasen a direccionar el sonido directo al público y las misas pasaron a ser parcialmente cantadas, complementando la liturgia con los cantos.

La influencia del cristianismo también queda reflejada en el **teatro de la Edad Media**. Se produce una profunda transformación del mundo teatral cambiando sus fundamentos y pasando de los temas clásicos al tema religioso, en un primer instante se asienta en las iglesias para posteriormente trasladarse al aire libre. Mientras que el teatro antiguo disponía de un recinto claro y definido para las representaciones, en este período nace el teatro urbano, el espectáculo se sitúa en las plazas públicas y otros lugares exteriores y se desarrolla en ausencia de edificios destinados para tal fin. Como consecuencia de esto, las preocupaciones acústicas desaparecen prácticamente.

A mediados del siglo XII nace el **arte gótico**. La transición de la pesada iglesia románica a la esbelta catedral gótica agravó aún más los problemas acústicos de los templos. En relación con la música, ciertas catedrales góticas empezaron a cerrar el coro con muros muy decorados y a doble altura, funcionando este como un volumen dentro de otro volumen y produciendo un efecto acústico curioso, los cantores se oían los unos a los otros como si estuviesen en un recinto pequeño y el sonido salía fuera del coro completamente mezclado como si se tratase de una fuente sonora única.

Pese a la ausencia de trabajos experimentales directos en relación con las diferentes Ciencias Naturales, es importante destacar la labor de dos monjes, **Alberto Magno (1193-1206)** y **Roger Bacon (1214-1294)**, que durante este siglo sientan las bases teóricas del método científico, de crucial importancia para el desarrollo de la Física Moderna. Ambos defienden la experimentación como medio para el estudio objetivo de la naturaleza, para lo cual se debe existir un planeamiento minucioso para los experimentos y contar con los aparatos necesarios para tal fin.

1.4. RENACIMIENTO.

Durante el periodo definido como Renacimiento se produjo un impulso a los campos de las artes y las ciencias. En uno de los primeros tratados del renacimiento, "De Re Aedificatoria", escrito por **Leon Battista Alberti (1404-1472)**, se defiende la presencia de las bóvedas en las iglesias por la dignidad de la edificación y la necesidad de que perduren en el tiempo, pese a conocer los efectos que producen los techos abovedados en cuanto a la acústica del recinto. El pensamiento del arquitecto italiano y de su generación relegaba el problema acústico de las iglesias a un segundo plano.

El principal representante de la reactivación de la preocupación por el saber científico fue **Leonardo da Vinci (1452-1519)**, genio universal, que cultivó el saber en campos como la anatomía, arquitectura o ingeniería. En lo referente a

la acústica, da Vinci estudió la propagación del sonido en el agua, como se puede observar en el siguiente texto:

“¡En las dos instancias se cumple la misma ley de la Mecánica! Tal como las ondas en el agua provocadas por la caída de una piedra, así se comportan las ondas del sonido al viajar por el aire, cruzándose unas con otras sin mezclarse, y preservando su centro respectivamente como origen de cada sonido... Por lo tanto, solo existe una ley de la Mecánica para todas las manifestaciones de la fuerza”.

Del pensamiento anterior se sobreentiende el principio de superposición, fundamental para conocer el comportamiento de los fenómenos ondulatorios en medios lineales no dispersivos.

Da Vinci también estudió el fenómeno del eco, llegando a la conclusión de que el sonido debe tener una velocidad finita. Igualmente descubre la resonancia para cuerpos afinados en la misma nota (Durá Doménech, 2005). Asimismo, se puede considerar pionero en la técnica del sónar, como se puede ver en la siguiente observación: *“...si con tu barco parado, introduces en el agua un tubo largo y colocas tu oído en el otro extremo, oirás barcos que están a gran distancia de allí”.*

Entre los años 1545 y 1563 tiene lugar el **Concilio de Trento**, y fruto de las determinaciones del mismo y la importancia que se dio a la predicación a partir de ese momento, se empieza a considerar el problema acústico de las iglesias. Prueba de ello es la documentación elaborada por la orden jesuita, que jugó un papel muy activo en el Concilio y que valoraba especialmente la acústica de las iglesias, en la que se hace alusión principalmente a la importancia de las cubiertas en las condiciones acústicas de las mismas (Navarro Casas y Sendra Salas, 1997).

En 1569, el padre provincial de Toledo, **Gonzalo González** escribe una carta a Roma al prepósito general de los jesuitas, **S. Francisco de Borja**, alabando las excelentes condiciones acústicas de la primera iglesia jesuítica de Madrid, inaugurada en 1557 y trazada por **Bartolomé de Bustamante** (1501-1570). Acaba la carta expresando su desencanto con otras iglesias cubiertas con bóvedas, menos económicas y con una deficiente inteligibilidad:

“Está la iglesia embarazada con que la enladrilla el P. Rector, y quedará su iglesia muy linda y el más lindo auditorio de Madrid, con ser de largo de ciento treinta y tres pies, y de ancho que cuarenta. Más por ser la techumbre de madera se oye en todas partes, que yo no sé por qué no se usan las iglesias de esta techumbre, pues es más barato y se gozan los sermones, y en las de bóvedas veo que nunca se oye en la media iglesia ni se entiende; deseo saber en esto la voluntad de v.p. y su parecer”.

Una segunda prueba documental la constituye la carta que el cardenal **Alejandro Farnesio** le escribe al arquitecto **Jacopo Barozzi de Vignola** (1507-1573) en 1568 en relación a la construcción de la iglesia madre en

Roma, “La Iglesia del Gesù” (ver fig. 1.10). Farnesio se comprometió a financiarla y ante la presión de los jesuitas para que cubriese la iglesia con techo plano de madera le escribe a Vignola marcándole diversas pautas para la construcción de la misma, el costo, la proporción de acuerdo con las reglas de la arquitectura y la presencia de una bóveda de cañón. Según las palabras de Farnesio:

“...la iglesia tendrá una sola nave, con capilla a ambos lados, cubierta con bóveda y no de otro modo, aunque los jesuitas crean que eso dificultará la predicación. Ellos piensan que la voz resonará de modo ininteligible a causa del eco...”

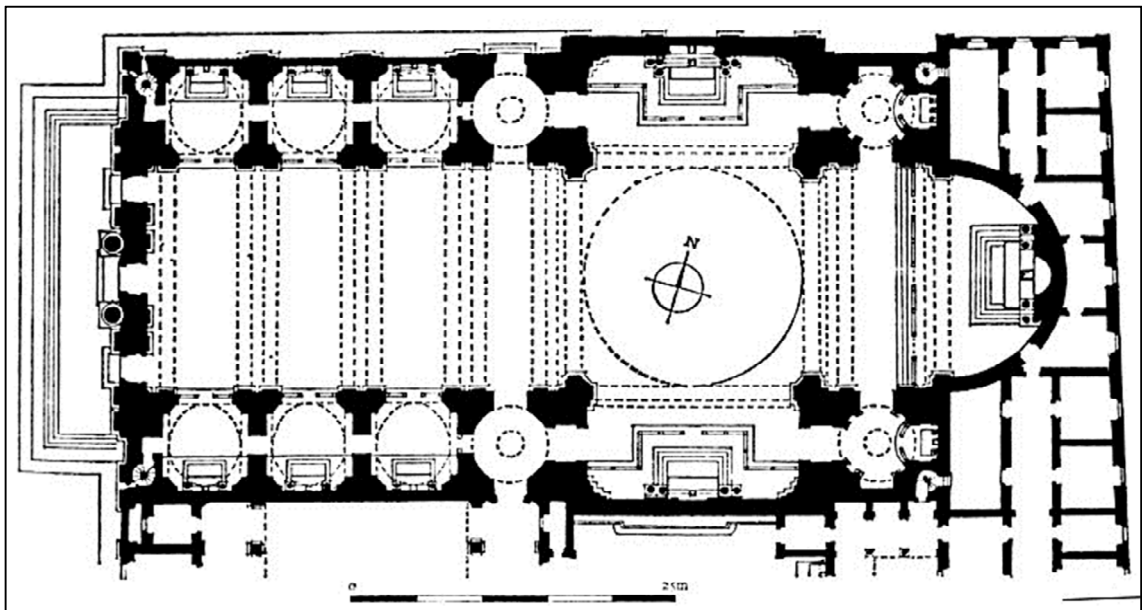


Fig. 1.10. Planta de la Iglesia del Gesù de Vignola.

Con **Galileo Galilei** (1564-1642) comienzan los primeros tratamientos científicos acerca del sonido, de la música y del estudio moderno de las ondas y la acústica; además de contemplarse realmente la física como ciencia.

Galileo realizó numerosos avances en las disciplinas relacionadas con la acústica, estableciendo los parámetros que influyen directamente en la frecuencia de oscilación del péndulo (ver fig. 1.11). Llegó a la conclusión también de que la frecuencia de los sonidos depende de la masa del cuerpo vibrante, de su longitud y de la tensión a la que se somete, estableciéndolos como parámetros que determinan el movimiento vibratorio de una cuerda. Además estudio la resonancia, concepto ya descubierto por Da Vinci.



Fig. 1.11. Galileo y el péndulo

Sin embargo fue el religioso **Marin Mersenne** (1588-1648) quien realizó los estudios más extensos sobre el sonido, ganándose el sobrenombre de “Padre de la Acústica”. Mersenne escribió cerca de una decena de libros sobre acústica, tanto teórica como experimental, mostrando una metodología muy cuidadosa en sus experimentos, con el fin de llegar a resultados precisos. Hacía especial hincapié en la medida del tiempo transcurrido en las experiencias que llevaba a cabo (Durá Doménech, 2005). Al principio utilizaba el ritmo respiratorio, pero llegó a la conclusión de que era un factor donde intervenía la voluntad del ser humano por lo que posteriormente utilizó las pulsaciones del sujeto.

Una de las cuestiones que ocupó la mayor parte de sus investigaciones fue la velocidad del sonido. Mersenne abordó el problema mediante dos procedimientos: primeramente midió el tiempo que tardaba un sonido en llegar a una pared y volver a reflejarse, obteniendo un valor aceptable, 318 m/s, teniendo en cuenta la ausencia de una medida exacta del tiempo. En el segundo método midió la velocidad de propagación del sonido por el desfase entre la llegada del fogonazo de un cañón, que se suponía instantáneo, y el ruido del disparo del mismo. El resultado obtenido de la experiencia era excesivamente alto (448 m/s) pero en esta época se consideraba más fiable que el primer método y durante 200 años fue el procedimiento empleado en la medición de la velocidad del sonido.

También determinó la frecuencia de las distintas notas musicales utilizando cuerdas de varias decenas de metros y contando a partir de su percepción visual las oscilaciones producidas en las mismas. No menos importante es su interés por fomentar el intercambio y divulgación de conocimientos científicos siendo el principal responsable del primer foro a escala mundial de estas

características en el “Hôtel des Minimes” que contaba como miembros a científicos tan importantes como Pierre Fermat, Thomas Hobbes o Christian Huygens.

En el Renacimiento el **mundo teatral** empieza a adquirir una importancia considerable y las representaciones cambian su ubicación, trasladándose de las plazas y las calles a los palacios e igualmente supone el cambio de tener múltiples escenarios a un escenario único y fijo. Los conocimientos que se tenían en la época de los teatros procedían del Libro V de Vitruvio y muchos de los conceptos que contenían se adoptaron en este tiempo (Carrión Isbert, 1998.).

Así pues, se produce el cambio de los recintos aéreos a los cerrados, proporcionando mejoras de confort y aparición de los fenómenos de reverberación derivados de las reflexiones sonoras en las superficies interiores. Los nuevos teatros también presentaban menores dimensiones que los realizados en la antigüedad clásica, variable que influía beneficiosamente en su acústica. Del mismo modo, la reducción de distancias entre los actores y audiencia permitía una mejor distribución sonora y una mejora visual de la representación. En cuanto a la escena (*skené*), también reduce sus dimensiones, provocando una mejor focalización del sonido. Sin embargo, durante estos siglos tuvo lugar el gran desarrollo de la perspectiva y en muchos teatros, la escena estaba proyectada de forma que contenían calles y plazas para conseguir bellas perspectivas arquitectónicas pero perjudicial desde el punto de vista acústico.



Fig. 1.12. Teatro Olímpico de Vicenza.

Un buen ejemplo de teatro renacentista es el **Teatro Olímpico de Vicenza** (1580-84) proyectado por el arquitecto **Andrea Palladio** (1508-1580), uno de

los primeros teatros estables cubiertos hasta entonces (ver fig. 1.12). Mantiene la estructura básica interior del teatro griego y romano aunque presenta varias particularidades. El graderío ya no es semicircular sino semielíptico y la escena presenta un conjunto de calles prolongadas hasta el fondo del escenario y los laterales. Esta nueva configuración proporcionaba una mejora en el acondicionamiento acústico aunque se veía mermada por la elección de materiales pétreos en los laterales, que reducían la inteligibilidad de la sala. El gusto por los materiales pétreos, especialmente el mármol, hizo que los teatros del Renacimiento tuviesen la consideración de reverberantes (León Rodríguez, 1998.).

1.5. SIGLOS XVII-XVIII

En 1656 los científicos italianos **Vincenzo Viviani** y **Giovanni Borelli** realizaron varios experimentos con el fin de confirmar los resultados de las mediciones realizadas por Mersenne teniendo en cuenta variables como el viento, distancia, medidas en sentidos opuestos... llegando a un valor de 361 m/s. En una de las pruebas realizadas utilizaron dos armas separadas una distancia conocida, cuando el sonido del disparo de la primera llegaba a la segunda, disparaban ésta, siendo percibido el sonido tiempo después por los primeros. Esta prueba, aparte de permitir calcular la velocidad del sonido era utilizada para medir distancias y es el precedente de las técnicas modernas de ecolocalización.

El problema de la inexistencia de un patrón de tiempos y la anarquía que reinaba en la época entre las unidades de longitud empleadas eran dos de los obstáculos más importantes con los que se encontraban los científicos para llegar a unos resultados precisos en sus experiencias. El jesuita **Giovanni Battista Riccioli** (1598-1671) intentó encontrar un péndulo que tuviera un periodo exacto de un segundo. Para ello suministraba pequeños impulsos a la masa del péndulo para contrarrestar la disminución de amplitud provocada por el rozamiento obteniendo un periodo de 1,0049 segundos.

En relación con la acústica, en la segunda mitad del siglo XVII se produce un hito de gran importancia: la predicción teórica de **Isaac Newton** (1642-1727), de la velocidad del sonido en función de la densidad, publicando en 1687 la primera teoría matemática sobre el tema. Diversos experimentos realizados años más tarde, revelan un aumento de la velocidad del sonido en el aire con la temperatura. Los avances científicos permitieron relacionar el comportamiento elástico de los fluidos con sus diferentes estados termodinámicos. Un siglo después el matemático y físico francés **Laplace** (1749-1827) solucionó la problemática en torno a las teorías de Newton haciendo una hipótesis acerca del comportamiento de la presión en función de la densidad, suponiendo que la presión no dependía linealmente de la densidad sino de la densidad elevada a cierta potencia. Hasta los siglos XVII y XVIII no se establecieron sólidamente los conocimientos sobre termodinámica y las aportaciones de **Johann H. Lambert**, **Jacques A.C Charles** o **Joseph L. Gay Lussac** permitieron basar la hipótesis adiabática sobre la propagación del sonido.

El físico y matemático francés **Joseph Sauveur** (1653-1716) estimó el valor absoluto de la frecuencia de un sonido, observando las pulsaciones que se producían al hacer sonar dos tubos de órgano cuya diferencia tonal, apreciada por el oído, era de un semitono. Se le atribuye también la utilización de la palabra “acústica” para designar la ciencia del sonido.

En la Europa de la época la arquitectura enriquecía la música barroca, que gozaba de su máximo esplendor gracias a la figura de **Johann Sebastian Bach** (1685-1750). El compositor alemán era conocedor de las diferentes cualidades acústicas que tenían los recintos y su música estaba claramente influenciada por los diferentes espacios en los que la representaba. Su “Misa en Si Menor” y “Pasión según San Mateo” se componen exclusivamente para un tiempo de reverberación alto, como era el caso de la **Iglesia de Santo Tomás** de Leipzig de la cual fue director del coro desde 1723 hasta su muerte. Por otra parte, la serie de conciertos de Brandeburgo, estaban claramente destinados a ser tocados en un ambiente de cámara.

Retomando las aportaciones teóricas a los diferentes campos científicos, **Jean Baptiste Joseph Fourier** (1768-1830) desarrolló el principio de superposición de Bernoulli dando lugar a uno de los teoremas más importantes en la evolución de la acústica: el teorema de Fourier que enuncia que cualquier forma de onda siempre que sea periódica, se puede descomponer en una serie más o menos larga de ondas puras llamadas armónicos.

Los experimentos llevados a cabo por **Felix Savart** (1791-1841) permitieron medir las frecuencias exactas de notas musicales específicas utilizando una rueda dentada que al girar golpeaba una lámina. Por otra parte estableció los límites de las frecuencias audibles por el ser humano, situándolos en un umbral de 8 Hz a 24000 Hz. Mediciones posteriores de investigadores como Koenig o von Helmholtz situaron el límite inferior entre 16 y 32 Hz, atribuyendo la enorme variabilidad no sólo al individuo sino a la edad del mismo.

La figura de **Hermann L. von Helmholtz** (1821-1894) supone grandes contribuciones a varios campos de la física y en especial a la acústica. Su libro de 1863 “La ciencia de la sensación de tono como base fisiológica para la teoría de la música” se considera un pilar importante en la historia de la acústica e incluye la primera teoría sobre el mecanismo de la audición. Esta teoría, denominada teoría de la resonancia, resumía los resultados de 8 años de experiencia realizadas para confirmar la ley de Ohm de la audición enunciada 20 años antes diciendo: “Las diferencias de timbre de los distintos sonidos, provienen únicamente de la presencia de armónicos y de su intensidad relativa”.

En el desarrollo de sus estudios von Helmholtz inventó el resonador que lleva su nombre, de grandes aplicaciones en Acústica Arquitectónica, dispositivo que absorbe la energía sonora de una onda de frecuencia determinada en función de las características geométricas del aparato (ver fig. 1.13).

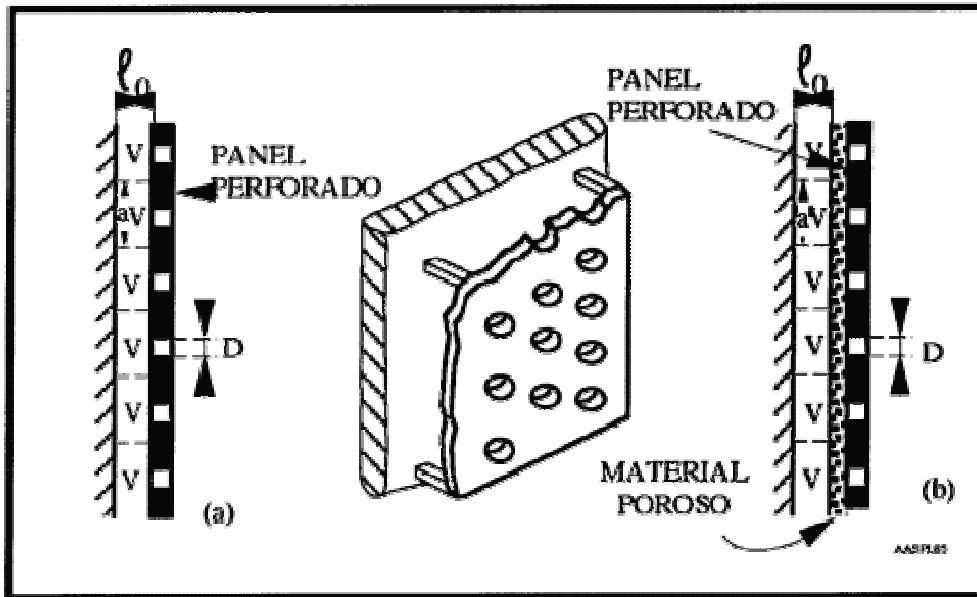


Fig. 1.13. Resonador de von Helmholtz.

1.5.1. EL TEATRO BARROCO Y NEOCLÁSICO.

Mención aparte merece la evolución en la construcción de teatros en los siglos XVII y XVIII, marcado por las corrientes artísticas dominantes en el momento: el barroco y el neoclasicismo. En ocasiones, las propiedades acústicas de las salas mejoraron considerablemente, mediante una combinación de intuición, experiencia y algo de fortuna. Otros proyectos, al contrario, fracasaron desde el punto de vista acústico pero sus diseños novedosos y su gran fama ayudaban a paliar estas deficiencias.

Es en el **Barroco** cuando la música, representada en los teatros de ópera, alcanza su mayor auge. En las primeras óperas aún se podía ver la influencia de la arquitectura clásica griega y romana, como en el **Teatro Farnese** en Parma (1618-28) (ver fig. 1.14) de **Giovanni Battista Aleotti** (1546-1636) que poseía un anfiteatro alargado. Desde el punto de vista acústico carecía de calidad ya que el proscenio (*proskénion*), donde el espacio de separación entre la escena y la audiencia provocaba que el recinto del escenario, al independizarse del volumen de la sala, actuase como un espacio acoplado al principal. Pese a este defecto, la mayoría de los teatros posteriores presentaban una estructura análoga. Años más tarde, se empezó a incluir un espacio destinado a la orquesta (foso) consecuencia del papel esencial de la música en las representaciones y las proporciones iban variando, haciéndose más largos que anchos. Aunque el nuevo diseño mejoraba las reflexiones laterales, generaba otras en el fondo de la misma, con lo que el problema acústico seguía sin resolverse.



Fig. 1.14. Teatro Farnese.

Otra ópera notable fue el **Teatro Santi Giovanni e Paolo** construido en 1638 y remodelado específicamente para ópera en 1654 por **Carlo Fontana** (1634-1714). La importancia de esta obra reside en que fue la primera ópera italiana barroca que desarrolló completamente la planta en forma de herradura. Fontana también diseñó con forma oval truncada el **Teatro Tordinona de Roma** (1666-1670) debido a la unidad visual que se conseguía. Los resultados acústicos con la forma oval no tuvieron excesiva repercusión, ya que en la mayoría de los teatros las filas de palcos, junto con los paramentos laterales, reducían significativamente el efecto focalizador (Long, 2005.).

En el siglo XVIII se produce un gran cambio en el diseño de los teatros, en parte gracias a la música. Las óperas se empezaron a construir específicamente para la música de los contemporáneos (Gluck, Haydn o Mozart). La ópera de estilo italiano, como género musical teatral, tiene una imponente claridad acústica, permitiendo al receptor escuchar la articulación de las palabras y el detalle musical de pasajes cantados muy rápido, como por ejemplo con los trabalenguas de las Arias de Mozart. Esta claridad se veía potenciada por la cantidad de material absorbente existente cuando la audiencia se congregaba en los palcos y en el patio de butacas, todo en un espacio pequeño. Por ello, el techo solía ser plano, evitando los problemas de focalización sonora de cúpulas y bóvedas y se empieza a revestir con madera paredes y techo, cambiando completamente los criterios a la hora de proyectar las óperas. El resultado era un aceptable acondicionamiento acústico de la sala pero los autores de la época tenían un concepto erróneo sobre el comportamiento de los materiales ya que pensaban que los paneles de revestimiento actuaban por reflexión aumentando los niveles de presión sonora y no por absorción.

En Italia, destaca la familia **Galli-Bibienas**, familia de arquitectos especialistas en el diseño de teatros, que hicieron grandes aportaciones a la Acústica Arquitectónica, introduciendo la planta en forma de campana atendiendo a su comportamiento acústico. El teatro **Comunale** de Bolonia (1763) es un buen ejemplo de la obra de estos arquitectos. Pese a utilizar revestimiento pétreos y un techo oval la acústica no era tan deficiente como se podía esperar. Esto tiene su explicación en la existencia de un “hoyo acústico” bajo el suelo de madera del foso de la orquesta para reforzar el sonido de la misma.

El **Neoclasicismo** surge a mediados del siglo XVIII y es en Francia donde se produce el desarrollo más importante de proyectos de óperas durante los años de auge de este movimiento. Destaca por sus características espaciales y acústicas la **Ópera de Versalles** (1770) de **A.J. Gabriel** (1698-1782). El tamaño de la sala (de dimensiones discretas) y el empleo de materiales adecuados como paneles de madera pintados contribuyeron notablemente a su buen comportamiento acústico. Gabriel proponía la planta ovalada para el diseño de las salas, forma que también adoptó para sus proyectos el francés **Pierre Patté** (1723-1814) en su obra “Essai sur l’architecture théâtrale” de 1774 (ver fig. 1.15). Patté defiende esta forma para el acondicionamiento de los teatros por sus propiedades focalizadoras.

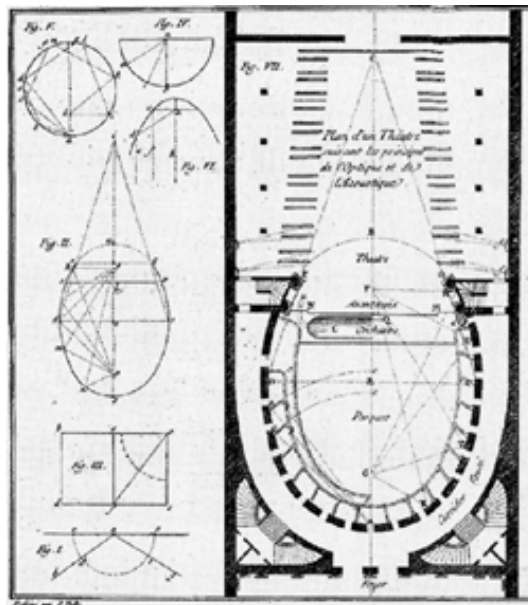


Fig. 1.15. Diseño de planta oval de Pierre Patté.

Consecuencia del pensamiento ilustrado reinante en estos siglos, los arquitectos neoclásicos buscaron una gran simplicidad en sus obras, basado en la geometría pura del cubo y la esfera. Aunque la mayoría de estos proyectos no se construyeron, su comportamiento acústico sería discutible. Un ejemplo de esta tendencia lo constituye un proyecto del arquitecto francés **Etienne-Louis-Boullé** (1728-1799) con un gran auditorio semicircular con media cúpula artesonada de grandes dimensiones lo que podría dar lugar a indeseados efectos focalizadores de sonido.

En 1790 **George Saunders** (1762-1839) publica "Theatise on Theatres" en el que recomienda la planta de forma circular truncada por razones acústicas y de visión (ver fig. 1.16). **Benjamin Wyatt** (1746-1813) imita el diseño propuesto por Saunders para la remodelación del **Teatro Real Drury Lane** en el año 1812, que curiosamente fue remodelado a causa de los problemas de visión y de acústica.

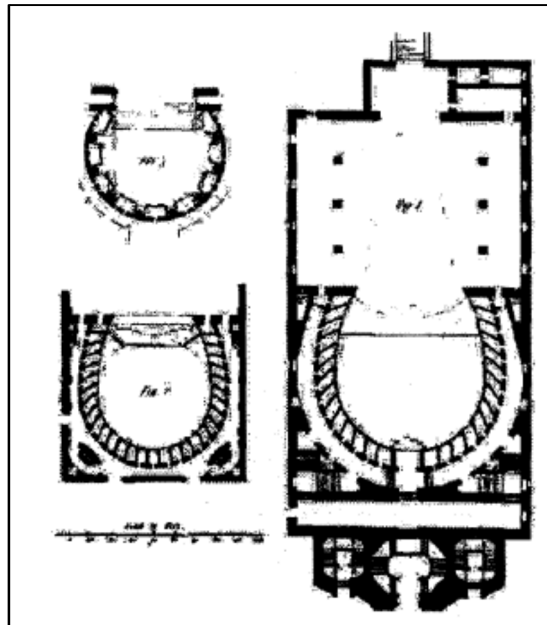


Fig. 1.16. Comparativa de tres teatros de ópera. Theatise on Theatres.

Como se desprende de lo visto hasta el momento, las óperas y otras salas de teatro estaban supeditadas a las corrientes arquitectónicas de la época y los cánones que se marcaban no siempre resultaban favorables para un correcto comportamiento acústico. La ausencia de criterios científicos sólidos que determinasen la calidad acústica de los espacios arquitectónicos hacía que todos los proyectos se basasen en la experiencia, aproximaciones e intuición. No fue hasta finales del siglo XIX y principios del XX, cuando nace la Acústica Arquitectónica tal y como la conocemos hoy en día gracias a la figura de W.C. Sabine.

1.6. MESOAMÉRICA.

La acústica aplicada a la arquitectura también tuvo su relevancia en la Mesoamérica precolombina durante la ocupación de los antiguos mayas.

En su vida cotidiana estaban presentes sus creencias religiosas, que por descontado se reflejaban tanto en los templos dedicados a las divinidades (vinculadas a la naturaleza) como en las edificaciones para uso cotidiano. Algunos de estos templos presentan curiosos fenómenos acústicos no se sabe si intencionadamente si fruto de la casualidad.



Fig. 1.17. Vista del Chichén Itzá

En la que se considera la ciudad maya más famosa del mundo, **Chichén Itzá** (fundada hacia el año 525), se produce el llamado efecto de “la cola del Quetzal” descubierto primeramente por el ingeniero en acústica estadounidense **David Lubman** y confirmadas en 2004 por el científico **Nico Declerq** y un grupo de científicos belgas de forma experimental.

El asentamiento está presidido por la gran Pirámide de Kukulcán (ver fig. 1.17), uno de los monumentos más famosos y notables de la arquitectura maya. Es una pirámide de forma base cuadrada que culmina en un templo de forma rectangular al que se accede por escaleras situadas a cada lado flanqueadas por balaustradas

El efecto acústico de “la cola del Quetzal” se produce al emitir un sonido impulsivo (sonido de corta duración pero de fuerte volumen) como un estallido o un aplauso delante de la escalinata de acceso a la pirámide que hace que se escuche un sonido agudo parecido al canto del quetzal, ave sagrada de los mayas.

El fenómeno acústico se explica por la geometría de las escaleras que se convierte en un monumental difractor de sonido. Los escalones (ver fig. 1.18) son de base muy estrecha y la tabica es más grande de lo normal, lo que hace que cuando alguien aplaude frente a una de las cuatro escaleras, el sonido no golpea con una sola superficie plana vertical sino contra muchas con muy poca separación entre ellas, lo que da lugar a un eco múltiple ligeramente desfasado.



Fig. 1.18. Escalera de la Pirámide de Kukulcán.

Primeramente el equipo de Declerq demuestra mediante ensayos y simulaciones que la altura y el espacio entre escalones crean un filtro acústico (como en las gradas de los teatros griegos) que enfatiza algunas frecuencias de sonido y suprime otras. Posteriormente se llega a la conclusión de que el efecto está relacionado con la mezcla de frecuencias de la fuente del sonido que influyen al eco. El oído humano no asimila este pequeño desfase por lo que lo que se escucha es un sonido continuo que va cambiando de tono y produce un sonido agudo.

Declerq también encontró otro efecto acústico en la arquitectura maya: el llamado “efecto de las gotas de agua” producido al pisar las escaleras de la pirámide. El sonido de las pisadas se transforma en frecuencias similares a las gotas cuando caen sobre una superficie líquida. Se desconoce su intencionalidad aunque hay indicios de ello ya que el dios de la lluvia Chac está representado en lo alto de la pirámide.

La cultura maya es autora también de otra innovación acústica en la arquitectura. La arqueóloga **Francisca Zalaquett** descubrió en el año 2011 que los templos y plazas de la ciudad mexicana de **Palenque** (ver fig. 1.19) la cual se cree que fue fundada alrededor del año 100 a.C., estaban diseñados para amplificar el sonido, logrando los efectos de un altavoz moderno y permitiendo que los sonidos se oigan con claridad a una distancia de cien metros.

La investigación se apoya en un análisis arqueoacústico de los rituales públicos que se realizaban en las explanadas donde se situaban las plazas, estudiando las frecuencias producidas por los instrumentos musicales y su reverberación alrededor de la ciudad.

Zalaquett sostiene que los edificios funcionaban como amplificadores sonoros gracias a la capa de estuco que los recubría que, como demostraron en laboratorio, alteraba la reflexión y absorción de los sonidos.

Se identificó igualmente los recintos dedicados a la emisión del sonido, utilizados por músicos, oradores y sacerdotes por la frecuencia, calidad y el volumen del sonido; y los recintos receptores.



Fig. 1.19. Poblado de Palenque.

1.7. ARTE ISLÁMICO.

Los procesos de restauración e investigaciones paralelas de diversas mezquitas construidas en el período otomano pusieron de manifiesto la preocupación y los conocimientos de los arquitectos de la época de las condiciones acústicas de estos lugares de culto. Uno de los arquitectos más famosos fue el turco **Sinan Ibn Abdulmennan** (1489-1588) cuyos trabajos aunaban las características de la arquitectura otomana y revolucionaron la concepción estética del Islam.

En las tres grandes mezquitas construidas por Sinan se encontraron resonadores de cavidad, técnica ya conocida por Vitruvio, como se destacó en el período perteneciente a la Antigüedad Clásica y que tuvo una fuerte presencia en la arquitectura otomana y selyúcida. El **hospital del Sultán Gevher Nesibe** construido en 1205 es un buen ejemplo de ello. La institución fue supuestamente el primer hospital del mundo que trató pacientes con trastornos mentales y utilizaba música con fines terapéuticos que se oía en todas las habitaciones gracias a los canales de sonido practicados estratégicamente.

Las mezquitas tienen como cubierta cúpulas de grandes dimensiones situadas a mucha altura, factores que no resultan propicios para la obtención de una buena acústica, ya que sus reflexiones internas hacen que el sonido llegue con retardo a la audiencia y baje el nivel de comprensión del orador. Para paliar el problema, la mayoría de mezquitas otomanas tienen una gran cantidad de ornamentos, relieves y figuras de complejidad geométrica que actúan como difusores rompiendo la onda en pequeñas reflexiones pero no solucionan la excesiva reverberación existente a causa de volúmenes de tales dimensiones

En una cúpula de grandes dimensiones, la energía reflejada se va retrasando y se causan ecos (ver fig. 1.20). La presencia de resonadores de cavidad permite la absorción de parte de la reflexión de esta energía mientras que la otra parte es irradiada de nuevo en todas partes del espacio creando un espacio difuso y un efecto divino en la atmósfera de adoración (Kayili, 2005.)

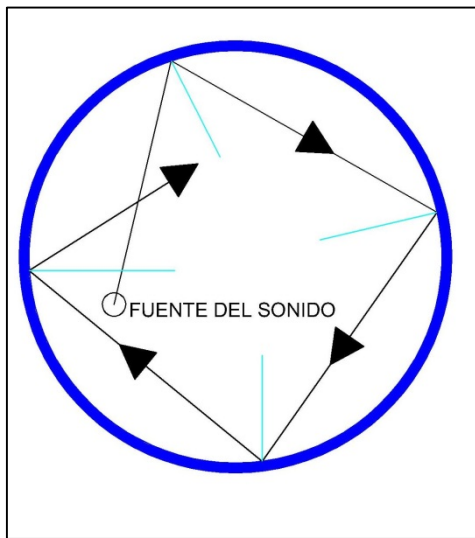


Fig. 1.20. Reflexiones en una cúpula.

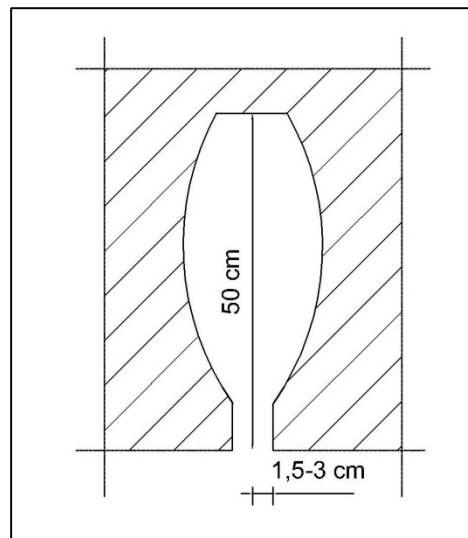


Fig. 1.21. Resonador de La Mezquita Azul.

Durante los trabajos de restauración de **Sultán Ahmet**, La Mezquita Azul, en el año 1986 se descubrieron 65 resonadores (ver fig. 1.21) en la cúpula, enyesados en trabajos anteriores.

Análogamente, se encontraron un número importante de vasijas de barro en la cúpula de la mezquita **Selimiye** pero con sus aperturas cubiertas de ladrillos enyesados.

En Estambul, en la mezquita **Shehzade**, la mezquita de la princesa, se encontraron 144 resonadores y en la mezquita **Sokullu Mehmet Pasha** 36 rastros de agujeros en la cúpula central y de 42 a 45 agujeros en cada uno de los cuartos de cúpula laterales.



Fig. 1.22. Resonadores escondidos en la cúpula de Süleymaniye

Las mediciones realizadas durante la investigación, en las mezquitas de **Süleymaniye** (ver fig. 1.22) y **Selimiye** revelan tiempos largos e irregulares de reverberación en frecuencias bajas, resultado esperado ya que las aberturas cerradas son incapaces de funcionar como resonadores.

1.8. SIGLOS XIX-ACTUALIDAD.

Podemos ver en este recorrido histórico que los grandes avances en la acústica están íntimamente ligados al asentamiento de las bases de otras disciplinas científicas como la óptica, la mecánica o la termodinámica dada su naturaleza multidisciplinar y de ciencia frontera entre varias materias de la ciencia (ver fig. 1.23). En “Origins in Acoustics”, publicada en 1954 por el profesor Frederick Vinton Hunt se enfatiza sobre el tema: *“Hablar de acústica es situarse justo en medio de un cruce de caminos, de tal forma que la acústica produce sus frutos más sabrosos cuando se le observa como una síntesis de otras disciplinas clásicas, mucho más que cuando se le estudia aislada contextualmente.”*

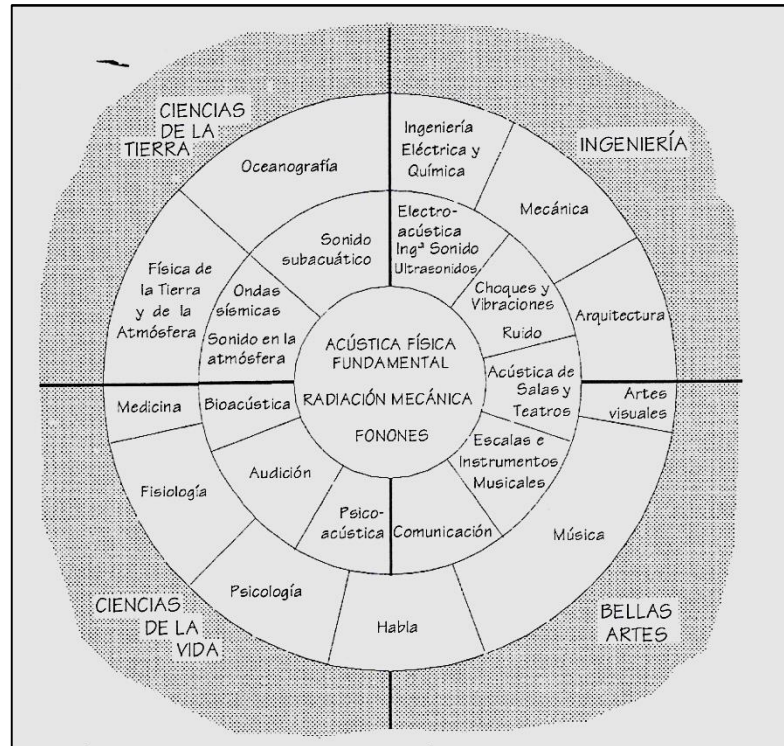


Fig. 1.23. Naturaleza multidisciplinar de la acústica.

El siglo XIX fue muy prolífico en cuanto a inventos relacionados con el registro y reproducción de sonidos musicales así como la voz humana, como fueron el teléfono y el telégrafo y las contribuciones a la acústica teórica resultaron de vital importancia para el entendimiento actual de la disciplina. Destacan los estudios de **Maxwell** (1831-1879) sobre la propagación de ondas electromagnéticas que fundamentaron los pilares de la acústica moderna, desarrollada por **John William Strutt** (1842-1919) en su publicación “The Theory of Sound” que consta de dos volúmenes escritos entre 1877 y 1878. Al morir su padre recibe el título honorífico de tercer barón Rayleigh, siendo conocido a partir de ese momento con el sobrenombre de **Lord Rayleigh**.

El interés de Rayleigh por la acústica surgió tras leer la obra de von Helmholtz, lo que le permitió escribir un extenso artículo sobre resonadores en 1870. En este artículo queda patente su metodología de trabajo, razonando problemas físicos por medio de desarrollos matemáticos de manera que tuvieran una relación con situaciones experimentales comprobables, lo que le permitía verificar en la práctica los resultados obtenidos de forma teórica. Este trabajo le permitió ver la necesidad que había de revisar y reelaborar el material disponible sobre acústica, hecho que incluye en el prólogo de “The Theory of Sound” (Durá Doménech, 2005).

Con esta obra Rayleigh dejó perfectamente definidos los principios teóricos y prácticos que rigen los fenómenos relacionados con el sonido. En el volumen I de “The Theory of Sound” se incluyen estudios sobre vibraciones armónicas, vibraciones eléctricas y vibraciones de membranas y planos, entre otras. El volumen II trata sobre vibraciones en el aire y en tubos, reflexión y refracción

de ondas planas, ecuaciones generales, teoría de los resonadores y teoría de la audición, realizando numerosos experimentos donde demostraba los contenidos teóricos del sonido.

Entre 1910 y 1915, Lord Rayleigh estudió la catedral de San Pablo de Londres y publicó una serie de artículos en los que explicaba en términos cuantitativos el fenómeno conocido como “susurro de galerías”. Este fenómeno de propagación del sonido se produce en recintos abovedados o con paredes de forma cóncava. Cuando una persona susurra en un punto de la sala, este susurro es prácticamente imperceptible para puntos cercanos al hablante pero otro situado a cierta distancia será perfectamente capaz de escuchar el sonido emitido.

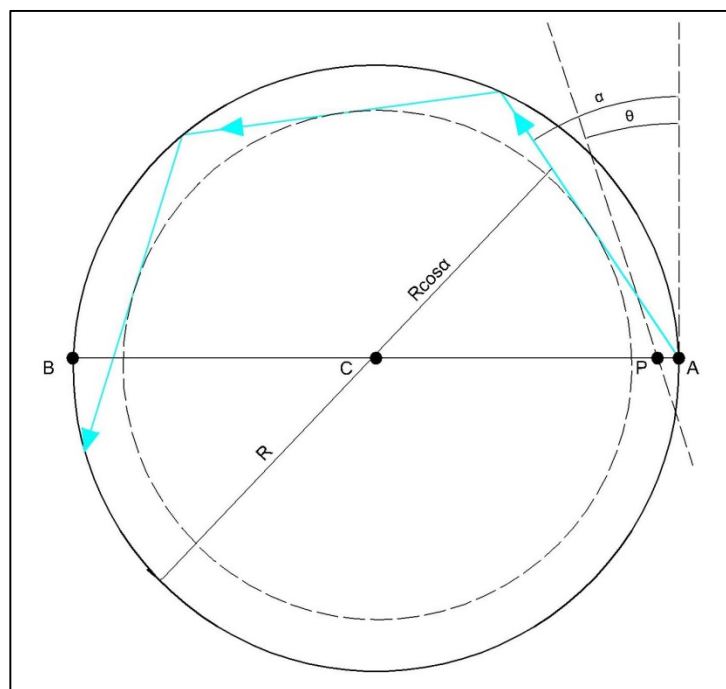


Fig. 1.24. Explicación gráfica del “susurro de salas”.

Lord Rayleigh explica el fenómeno acústico de la siguiente manera: “Si la persona colocada en P, habla en voz baja, dirige su boca de forma más o menos paralela a la pared de la sala, formando un ángulo θ con la tangente que pasa por el punto A, tendremos que los rayos sonoros emitidos quedarán emitidos dentro de una región anular limitada por los radios R y $R \cos \alpha$ ” (ver fig. 1.23). Este caso de propagación de ondas comprendidas entre dos círculos concéntricos es similar al esquema de propagación que tiene lugar entre dos paredes reflectantes que se hallan próximas entre si por lo que cumple que la intensidad varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente. Entonces, si α tiende a 0, es decir, emisión de la voz muy cercana de forma paralela a la pared reflectora, se obtiene que la intensidad media del sonido tenderá al infinito y se producirá un fuerte incremento de la voz en puntos próximos entre si y equidistantes de la sala.

El susurro de galerías también es apreciable en la Grand Central Terminal de Nueva York, la sala de los secretos del Monasterio del Escorial o la sala de los de los secretos de la Alhambra de Granada.

El planteamiento actual de la acústica arquitectónica nace en los primeros años del siglo XX siendo su principal exponente. **Wallace Clement Sabine** (1868-1919). Existe una cierta controversia acerca de este hecho al considerar, por parte de algunos autores, que las aportaciones de Vitruvio suponen el inicio de la integración de la acústica en la arquitectura. Si bien es cierto que el comportamiento acústico de los teatros griegos, como se apuntó en apartados anteriores, se consideran maravillas de la arquitectura e ingeniería, Vitruvio no especificó factores como el uso, dimensiones, disposición de cubiertas, interrelación entre fachada, cerramientos y forjados ni el confort térmico y acústico de la construcción. En especial los dos últimos factores que se relegan a un segundo plano en las edificaciones a lo largo de la historia (Durá Doménech, 2005).

Joseph Henry (1797-1878), científico estadounidense, realizó la primera consideración objetiva de temas acústicos cuando recibe el encargo por parte del presidente de los EEUU del estudio de los planos de la Cámara de los Representantes ya que las anteriores remodelaciones suponían unas soluciones acústicas inadecuadas. Los estudios de Henry se basan en encontrar una relación directa entre sus conocimientos de física y los fenómenos observados en la realidad. Investigó los límites de la percepción del eco y la problemática de la posición relativa de la fuente y del receptor del sonido, aunque sus estudios más significativos se encuentran en el tratamiento energético de los fenómenos acústicos de la reverberación y absorción y la distinción entre eco y reverberación.

Henry plasmó en un informe elaborado para la “Smithsonian Institution” después de realizar el anterior encargo sus ideas respecto a los proyectos edificatorios y la relación entre la física y la arquitectura como se puede leer en los siguientes párrafos:

“Los edificios modernos están hechos para otros propósitos distintos que el mero efecto artístico, y en ellos lo estético debe estar subordinado a lo útil, pienso que los dos valores deben coexistir, y un placer intelectual se derivará del sentimiento de adaptación y salud, combinado con la percepción de la armonía de las partes y la belleza del detalle.”

“La ciencia de la acústica aplicada a la edificación, quizás más que ninguna otra, requiere esta unión de principios científicos con deducciones experimentales”

En 1895 **W.C. Sabine**, de forma similar a Henry, recibe el encargo de mejorar las condiciones acústicas de una sala de conferencias de la Universidad de Harvard. Sabine amplió su estudio a dos salas cercanas las cuales contaban con una acústica aceptable. Utilizó la sala de laboratorio del salón de actos del

“Jefferson Physical Laboratory” como instrumentos de laboratorio para la investigación básica del comportamiento del sonido en espacios cerrados.

Fruto de estos experimentos, en 1898 descubre que la reverberación de un recinto es inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo, lo cual le permitió establecer la ecuación de reverberación utilizada como parámetro primordial para la caracterización acústica de una sala hasta nuestros días:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

Donde V es el volumen de la sala en m^3 y A_T es la absorción sonora total del recinto. Determina en dicha ecuación que la unidad de absorción sonora es el metro cuadrado al considerar que su valor era de la unidad cuando un material tenía la misma absorción que una ventana abierta de superficie igual a un metro cuadrado.

Tras el logro de la sala de la Universidad de Harvard, Sabine participó como asesor en la remodelación del auditorio “Boston Symphony Hall” (ver fig. 1.25). Contaba ya con numerosos estudios de acústica en recintos a sus espaldas lo que le sirvió para observar que mientras las buenas salas de conciertos tenían tiempos de reverberación de alrededor 2 segundos, las buenas salas de conferencia no llegaban a 1 segundo.



Fig. 1.25. Boston Symphony Hall.

La remodelación consistía en un aumento de volumen dejando intactas las superficies del auditorio. Las previsiones de Sabine ante el aumento de volumen eran que empeoraría su acústica al aumentar el tiempo de

reverberación, para subsanar esta contingencia se modificaron las superficies de las paredes. El “Boston Symphony Hall” se convirtió en el primer auditorio realizado con base científica.

Pese a las previsiones de Sabine, en el momento de la inauguración, comprobó que el tiempo de reverberación de la sala no se ajustaba a sus previsiones teóricas, con la consiguiente crítica por parte de los expertos en la materia y medios de comunicación. Sin embargo, en 1950, se demostró que los cálculos de Sabine eran correctos y aún hoy en día se considera una de las mejores salas del mundo desde el punto de vista acústico.

Sabine ligó el resultado de sus experiencias al ámbito de la arquitectura, al publicarlas en revistas no científicas sino de arquitectura y construcción, donde los profesionales que trabajan en estos ámbitos pudieran sacarle el mayor provecho. Otro de sus éxitos reside en su visión global de la acústica arquitectónica, estudiando el aislamiento a transmisión a ruido aéreo y de impacto y las cualidades acústicas de los materiales, asignándole a cada uno un coeficiente en función de su absorción acústica. Entre 1911 y 1920 trabaja con el arquitecto español Gustavino, desarrollando y patentando dos tipos de ladrillo (ver fig. 1.26) y varios revestimientos a base de cemento o yeso que mejoraban el comportamiento acústico de edificios ya construidos. El conocimiento del comportamiento acústico de los materiales de construcción suponía saber de antemano el comportamiento acústico del edificio terminado, algo impensable hasta el momento y supuso un gran impacto en este ámbito ya que los arquitectos empezaron a exigir datos a los fabricantes (Redondo Martínez, 2000).

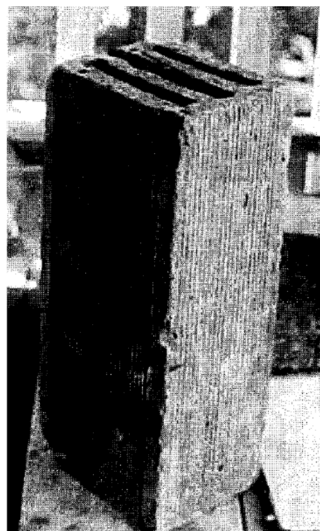


Fig. 1.26. Ladrillo patentado por Gustavino & Co. para la mejora acústica de edificios.

A partir de entonces, la acústica aplicada a la edificación inició un desarrollo evolutivo diferente en cada país. EEUU fue el país pionero fundando “The Acoustical Society of America” en 1929, formada en la actualidad por más de 7000 miembros entre los que se encuentran científicos especializados en acústica, física, biología o arquitectura. En el resto del mundo, Alemania,

Inglaterra, Francia, Dinamarca o Australia aunaron en organizaciones las actividades que se desarrollaban en torno a la acústica encontrando un marco válido de discusión y desarrollo.

El nacimiento de organizaciones, la evolución tecnológica y el periodo de crecimiento económico hace que la acústica se desarrolle como ciencia a partir de los años 30. Se implanta el teléfono como dispositivo masivo de telecomunicación así como el cine sonoro. Posteriormente, se desarrollan las tecnologías de micrófonos, altavoces y amplificadores para utilizarlos en trabajos de campo como aparatos de medición, relacionando las valoraciones subjetivas sobre la calidad acústica con una serie de parámetros objetivos.

Particularizando para España, la acústica empezó a cobrar importancia en 1969 cuando el Doctor Andrés Lara funda la Sociedad Española de Acústica. Los organismos políticos españoles empezaron a elaborar normativa, ordenanzas y leyes sobre acústica a partir de 1980 cuando el Ministerio dicta la primera normativa sobre condiciones acústicas mínimas en edificios: NBE-CA 88.

Ya en el siglo XXI la norma NBE-CA 88 suponía unos niveles de protección acústicos muy inferiores a los marcados por la Unión Europea, lo que dio lugar a la entrada en vigor en abril del año 2009 del Documento Básico de protección contra el ruido: CTE DB-HR que aproxima la edificación española a la calidad acústica europea.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 1.

PUBLICACIONES IMPRESAS.

CARRIÓN ISBERT, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1º Edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.

DURÁ DOMENECH, Antonio. *Temas de acústica*. Alicante: Universidad de Alicante, 2005. ISBN: 84-7908-816-8.

LONG, Marshall. *Architectural Acoustics*. 1º Edición. Burlington (Estados Unidos): Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 13:978-0-12-45555-18.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

ARAU-PUCHADES, Higini. Revisión del tiempo de reverberación. El método de cálculo, la precisión predictiva y la ley [en línea]. *ArauAcústica*. Disponible en Internet: <http://www.arauacustica.com/files/publicaciones/pdf_esp_27.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Desvelado el misterio acústico del teatro de Epidauro [en línea]. *Acústicaweb*. 2007. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/71-desvelado-el-misterio-acco-del-teatro-de-epidauro.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Acústica del Chichén Itzá [en línea]. *Acústicaweb*. 2007. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/acustica-arquitectonica/blog/acca-arquitectura/acca-de-chichitz.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. El efecto de la gota de agua en las pirámides mesoamericanas [en línea]. *AcústicaWeb*. 2009. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/306-el-efecto-de-la-gota-de-agua-en-las-pirdes-mesoamericanas.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Edificios acústicos en la ciudad de Palenque [en línea]. *AcústicaWeb*. 2011. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/399-edificios-de-la-ciudad-de-palenque.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Sala del oráculo del Hipogeo de Paola en Malta [en línea]. *Acústicaweb*. 2013. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/473-sala-del-oraculo-del-hipogeo-paola-en-malta.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

FORSTER, E.S. *The Works of Aristotle* [en línea]. 1927. Disponible en Internet: <http://archive.org/stream/worksof aristotle07arisoft/worksof aristotle07arisoft_djvu.txt> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

KAYILI, Mutbu. *ACOUSTIC SOLUTIONS IN CLASSIC OTTOMAN ARCHITECTURE* [en línea]. Muslimheritage. 2005. Disponible en Internet: <<http://www.muslimheritage.com/uploads/Acoustic.pdf>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

LEÓN RODRÍGUEZ, Ángel Luis. *La acústica de los teatros a través de la historia* [en línea]. Sociedad Española de la Historia de la Construcción 1998. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC2_035.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MARTÍN GARCÍA, Marta. *La música en el antiguo Egipto* [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.jimena.com/egipto/apartados/musica2.htm>>. [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

PERRAULT, Claudio. *Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitrubio* [en línea]. Traducido por Joseph Castañeda. Sociedad Española de la Historia de la Construcción. 1761. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/tratado.php?ID_pubD=41> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

REDONDO MARTÍNEZ, ESTHER. *Las patentes de Gustavino & Co. en Estados Unidos (1885-1939)*. Sociedad Española de la Historia de la Construcción. 2000. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_103.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SENDRA SALAS, Juan José; NAVARRO CASAS, Jaime. *Las iglesias como lugar de la música* [en línea]. Sociedad Española de la Historia de la Construcción. 1996. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC1_053.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SENDRA SALAS, Juan José; NAVARRO CASAS, Jaime. *El Concilio de Trento y las condiciones acústicas de las iglesias* [en línea]. Sociedad Española de la Historia de la Construcción. 1997. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC1_066.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

VERA GUARINÓS, JENARO. *Perspectiva histórica de la acústica* [en línea]. Analfatécnicos. Disponible en Internet: <<http://www.analfatecnicos.net/archivos/28.PerspectivaHistoricaDeLaAcustica.pdf>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

2.1. EL SONIDO.

- 2.1.1. GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO.
- 2.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SONIDO.
- 2.1.3. NIVEL DE PRESIÓN SONORA.
- 2.1.4. EL DECIBELIO. CLASES Y OPERACIONES.
- 2.1.5. CURVAS ISOFÓNICAS DE IGUAL SONORIDAD.

2.2. EL RUIDO.

- 2.2.1. TIPOS DE RUIDO.

2.3. DESCRIPTORES ACÚSTICOS, PARÁMETROS DE CONFORT ACÚSTICO Y FACTORES DE MÉRITO DE UN RECINTO.

- 2.3.1. DESCRIPTORES ACÚSTICOS.
- 2.3.2. PARÁMETROS ACÚSTICOS Y FACTORES DE MÉRITO DE UN RECINTO.

2.4. INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA.

- 2.4.1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

2.5. AISLAMIENTO ACÚSTICO Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

- 2.5.1. AISLAMIENTO ACÚSTICO.
- 2.5.2. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA.

A continuación se desarrollan los principales fundamentos científicos de la Acústica sobre los que se sustenta la integración del confort acústico en los proyectos de edificación actuales, así como los descriptores acústicos ligados a los mencionados fundamentos y los instrumentos de medición acústica utilizados en la edificación.

2.1. EL SONIDO.

El sonido puede definirse de varias formas. De todas ellas, las más habituales son las siguientes:

- Desde el punto de vista físico, el sonido es una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico.
- Desde el punto de vista fisiológico, el sonido es la sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico

De las dos definiciones se desprende que el sonido no se propaga a través del vacío, como lo hace la luz y además se asocia a un estímulo físico.

2.1.1. GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

La generación del sonido tiene lugar cuando la fuente sonora (elemento generador del sonido) entra en vibración. Esta vibración se transmite a las partículas contiguas a la fuente, que a su vez la transmiten a las partículas adyacentes. La perturbación no supone que las partículas se desplacen con ella, sino que se produce un movimiento oscilatorio alrededor de su posición de equilibrio. La manera en la que se traslada de un lugar a otro la perturbación se denomina propagación de la onda sonora.

De este modo, debido al agrupamiento de un gran número de partículas, se generan incrementos de presión locales respecto a la presión estática (que, en ausencia de ondas sonoras, se considera en estado de equilibrio constante en el espacio y en el tiempo) que se desplazan induciendo en otras regiones detrimentos de presión respecto a dicha presión estática.

La magnitud de un sonido se expresa de forma cuantitativa mediante la presión sonora, que representa las variaciones de presión o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. La figura 2.1 ilustra la evolución de la presión P_T , que se define como la presión total instantánea en el punto de observación. Dicha presión se obtiene como la suma de la presión atmosférica P_0 y la presión asociada a la onda sonora P . Los incrementos y disminuciones periódicas de presión sonora alrededor de su posición de equilibrio, correspondiente a P_0 , van asociadas a los procesos de compresión y dilatación

comentados anteriormente. El valor máximo de la oscilación respecto a P_0 recibe el nombre de amplitud de la presión asociada a la onda sonora.

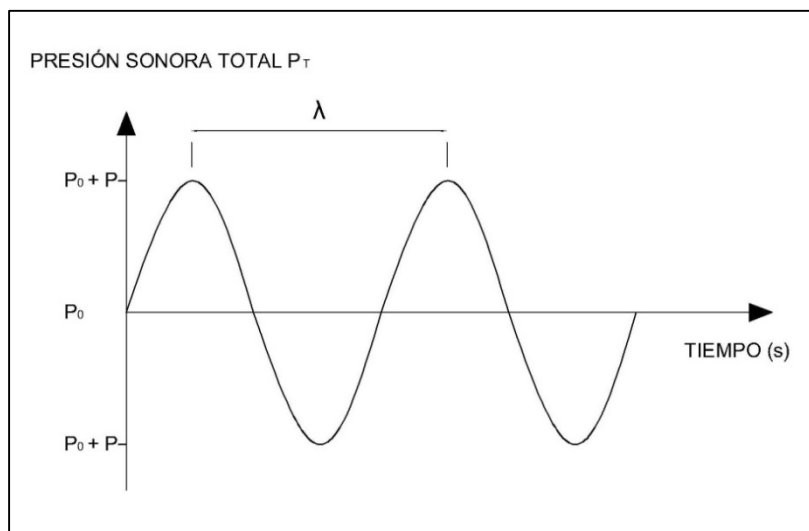


Fig. 2.1. Evolución de la presión sonora total en función del tiempo.

2.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SONIDO.

Tres conceptos físicos permiten definir el sonido y los valores que adopten tales conceptos proporcionarán las características de las ondas sonoras generadas y las sensaciones subjetivas que produzcan.

- **Frecuencia:** Se denomina **frecuencia** (f) de una función periódica en el tiempo al número de veces que la cantidad se repite a sí misma en un segundo. Se expresa en hercios ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/s}$). Es un parámetro íntimamente ligado al movimiento de vibración de las partículas respecto de su posición inicial de equilibrio e indica la rapidez con que se producen las variaciones de presión.
- **Longitud de onda (λ):** Es la distancia que necesita una onda sonora para realizar un ciclo completo, es decir, la distancia necesaria para que la presión aumente ligeramente por encima del valor de la presión atmosférica, a continuación disminuya hasta unos valores ligeramente por debajo al de ésta y aumente nuevamente hasta su valor inicial.
- **Velocidad de propagación del sonido (c):** Este parámetro es función de la densidad y de la elasticidad del medio de propagación. El aire es el medio habitual y en este medio, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica y de la temperatura. Considerando las condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 22°C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de 345 m/s aproximadamente. Hay que tener presente que el sonido puede propagarse en cualquier otro medio elástico y cuanto menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad de propagación del sonido.

En la tabla 2.1 se ilustran las diferentes velocidades de propagación para diferentes materiales de construcción:

Tabla 2.1. Velocidad de propagación del sonido según diferentes materiales.

Material	Velocidad de propagación (m/s)
Aire	340
Agua	1400
Placa de yeso	2400
Madera	2500
Ladrillo cerámico	2700
Hormigón	3400
Vidrio	4900
Acero	5000

La relación entre las tres magnitudes viene dada por la siguiente expresión:

$$c = f \cdot \lambda$$

Como se puede observar, para cada frecuencia, la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad y ésta varía con el medio.

La longitud de onda y la frecuencia, por otro lado, son inversamente proporcionales, por lo que los sonidos agudos o de altas frecuencias poseen longitudes de onda pequeñas, con las ondas situadas muy próximas; pasando lo contrario para los sonidos graves o de bajas frecuencias.

Un concepto importante ligado a la frecuencia es la **octava**, término con el que se denomina cada vez que la frecuencia multiplica por dos su valor. Si se necesita una información más representativa se divide una banda de octavas en tres partes denominándose cada una **tercio de octava**. Ambos conceptos se desarrollan en el apartado 2.2.

2.1.3. NIVEL DE PRESIÓN SONORA.

El oído humano es capaz de percibir una enorme variación de presiones sonoras, desde valores muy bajos: 2×10^{-5} hasta 200 Pa. Este enorme margen obliga a la utilización de una escala logarítmica para referirse a la presión sonora, así pues, se define nivel de presión sonora por la siguiente ecuación:

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_{ref}^2} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \text{ (dB)}$$

Siendo: NPS: acrónimo de Nivel de Presión Sonora, del término SPL (Sound Pressure Level). También se suele indicar como L_p .
 P: Presión sonora que se desea cuantificar (Pa).
 P_{ref} : Presión de referencia (Pa). Se toma un valor de 2×10^{-5} Pa correspondiente al umbral de audición humano a 1000 Hz.

El nivel de presión sonora se expresa en decibelios (dB) y varía entre 0 dB y 120 dB en los sonidos audibles. Presiones superiores pueden ocasionar daños inmediatos e irreversibles.

El conocimiento de la presión sonora por sí sola no proporciona la información suficiente sobre la emisión acústica ya que es una función escalar que para un entorno determinado depende de la distancia a la fuente sonora, la potencia sonora radiada por la fuente y de las características acústicas del entorno. La determinación del Nivel de Potencia Sonora permite predecir el N.P.S en cualquier punto del entorno acústico.

La potencia sonora se define como la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo. El Nivel de Potencia Sonora responde a la siguiente ecuación:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \text{ (dB)}$$

Siendo: L_w : Nivel de potencia sonora (dB).
 W : Potencia sonora que se desea cuantificar (W).
 W_{ref} : Potencia de referencia (Pa). Se toma un valor de 10^{-12} W correspondiente al límite de sensibilidad humana a 1000 Hz.

Otro concepto importante relacionado con la presión sonora es la intensidad sonora, que se define como el flujo medio de energía a través de una superficie de valor unidad perpendicularmente a la dirección de la propagación. Se expresa en W/m^2 . La expresión del Nivel de Intensidad Sonora se calcula según la ecuación:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \text{ (dB)}$$

Siendo: L_I : Nivel de intensidad sonora (dB).
 I : Intensidad sonora que se desea cuantificar (W/m^2).
 I_{ref} : Intensidad de referencia (W). Se toma un valor de 10^{-12} W/m^2 correspondiente al límite de sensibilidad humana a 1000 Hz.

2.1.3.1. Relación entre presión, potencia e intensidad:

La intensidad sonora y la presión sonora se relacionan sólo en ausencia de reflexiones, es decir, en un campo libre. En estas condiciones, en la dirección de propagación de ondas y en un punto particular se cumple lo siguiente:

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho \cdot c} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Siendo: I : Intensidad sonora (W/m^2).
 P_{rms} : Valor eficaz de la presión sonora (dB). Se define como el valor de la presión sonora equivalente al de una presión continua que produce el mismo efecto dinámico.

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

c : velocidad de propagación del sonido (m/s)

El producto $\rho \times c$ recibe el nombre de Impedancia Sonora del medio y su valor es de 406 rayls (unidad para impedancia sonora) para una temperatura $T = 20$ °C y una presión atmosférica $P_s = 751$ mm de Hg.

2.1.4. EL DECIBELIO. CLASES Y OPERACIONES.

Como vemos, el decibelio es la unidad en la que se expresan los diferentes niveles sonoros. Se define como una unidad logarítmica, adimensional y matemáticamente escalar. Es la décima parte de un Belio, logaritmo decimal de la relación entre la magnitud de interés y la de referencia.

La razón de la utilización de una unidad de medida de naturaleza logarítmica es que la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones sigue una escala aproximadamente logarítmica.

Pese a obtener medidas objetivas y tener una forma de operar muy cómoda, dado que la sensibilidad del oído tiene una fuerte dependencia de la frecuencia para diferentes niveles físicos del ruido, los resultados no siempre son precisos. A bajos niveles, solo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que para niveles altos, todas las frecuencias se escuchan con similar sonoridad. Ante la no linealidad del oído humano se introdujeron en los equipos para la medida del sonido unos filtros de ponderación en frecuencia cuyo objeto era obtener una respuesta semejante a la del oído humano. Las curvas internacionalmente aceptadas se denominan A, B, C, D y se denominan dBA, dBB, dBC, dBD las medidas tomadas con estos filtros.

Para niveles bajos de presión sonora se usa la curva de ponderación A, que atenúa de forma significativa los sonidos de baja frecuencia del espectro audible y en menor medida los de alta frecuencia. Es adecuada, por ejemplo, para la medición del sonido de fondo. La curva de ponderación B se usa para niveles intermedios y proporciona una reducción de sonidos de baja frecuencia menor que la curva A. Ofrece buenos resultados en la medición de niveles de escucha musical. La curva de ponderación C casi no atenúa las frecuencias graves y se planteó para la evaluación de ruidos de sonidos de alto nivel. Por último, la curva de ponderación D está normalizada para medida de ruido de aviones y enfatiza las señales entre 1 y 10 kHz. Por su sencillez de uso y la buena correlación que muestra entre los valores medidos y la peligrosidad de la señal sonora, la curva A es la que se emplea de forma más habitual. En la fig. 2.2 se comparan las curvas de ponderación A, B y C.

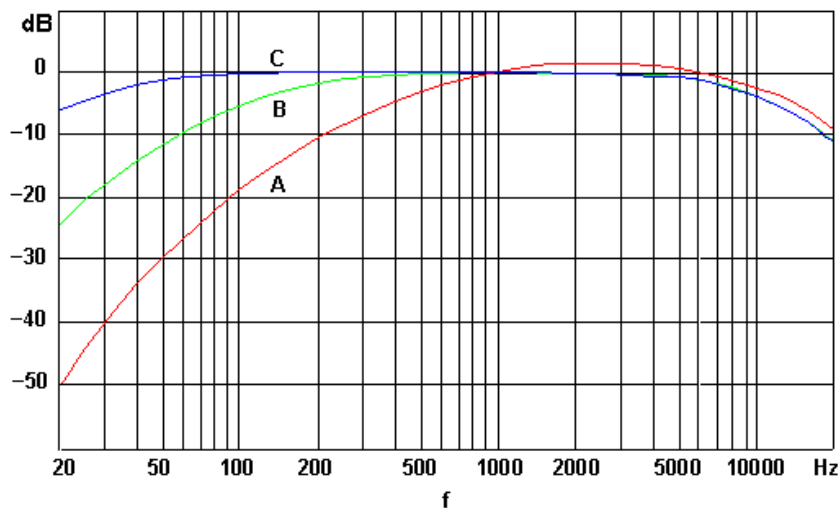


Fig. 2.2 .Curvas de ponderación A, B y C

Desde hace unos años el uso del dBA se ha utilizado para numerosas situaciones, sin tener en cuenta su N.P.S lo que hace que en ocasiones se pierda el objetivo del diseño inicial de las curvas de ponderación.

2.1.4.1. Adición de niveles de presión sonora.

Es evidente que la operación de suma no puede realizarse linealmente debido a la aplicación de una escala logarítmica a los decibelios. Se utiliza para ello la siguiente fórmula:

$$L_p = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10}$$

Siendo: L_p : Nivel de presión sonora (dB) total que se desea calcular.
 L_{pi} : Nivel de presión sonora (dB) de cada una de las fuentes.

Como ejemplo de lo que supone la operación, al sumar dos valores de 10 dB, el resultado que se obtiene es de 13 dB. Cada vez que se dobla la fuente, supone una adición de 3 dB.

2.1.4.2. Sustracción de niveles de presión sonora.

En ocasiones es necesario restar niveles de ruido, como es el caso de querer eliminar el ruido de fondo o calcular el ruido producido por una máquina que se encuentra en un ambiente ruidoso. La fórmula que nos permite realizar este cálculo es la siguiente:

$$L_{pi} = 10 \cdot \log (10^{L_p/10} - 10^{L_a/10})$$

Siendo: L_{pi} : Nivel de presión sonora (dB) de la fuente que deseamos calcular.
 L_a : Nivel de presión sonora ambiental.

L_p Nivel de presión sonora (dB) total.

2.1.5. CURVAS ISOFÓNICAS DE IGUAL SONORIDAD

El rango de audición del oído humano está entre los 20 Hz y los 20000 Hz pero para el mismo nivel de presión sonora, el ser humano no percibe de la misma manera todas las frecuencias, dentro del mencionado umbral la sensibilidad es máxima para las frecuencias medias, desde 1000 a 5000 Hz y es mucho menor para valores situados en los extremos, especialmente para bajas frecuencias.

Para que el oído perciba con la misma sensación sonora en cuanto a sonoridad e intensidad los sonidos, aquellos de muy bajas y muy altas frecuencias deberán poseer mayor nivel de presión sonora real que los sonidos de frecuencias centrales. Esto se muestra en las curvas isofónicas de igual sonoridad (ver fig. 2.3) que representan el nivel de presión sonora necesario a cada frecuencia para que el cerebro perciba la misma sonoridad subjetiva en todo el rango.

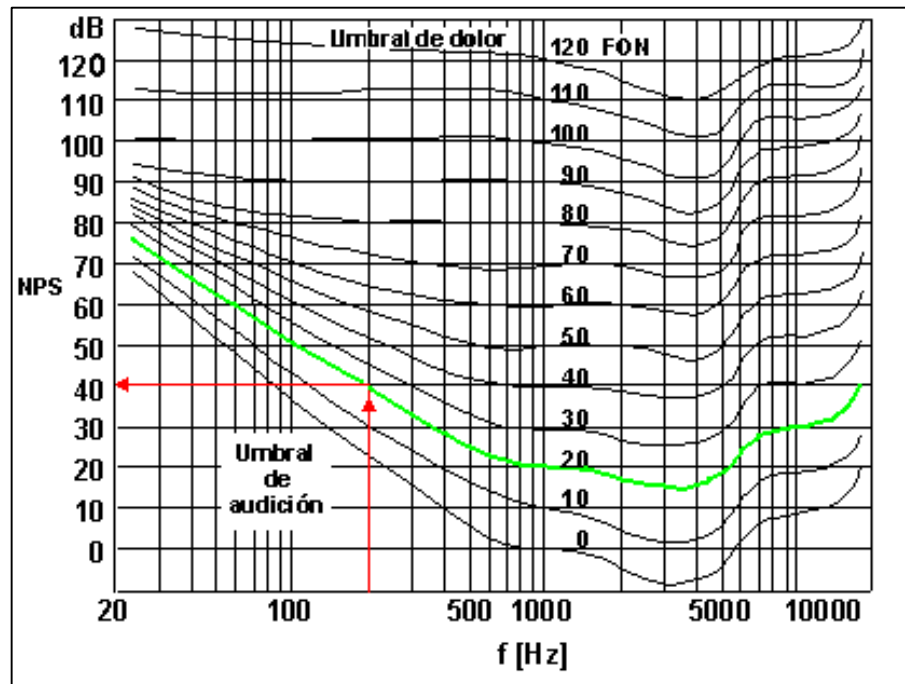


Fig. 2.3. Curvas isofónicas de igual sonoridad.

2.2. EL RUIDO.

Se suele considerar ruido como cualquier sonido no deseado. Esto resulta de la respuesta subjetiva del oído a los sonidos, y de los N.P.S ya que un sonido agradable como puede ser la música puede convertirse en uno molesto si tiene unos N.P.S elevados. Pero aparte de esta componente subjetiva, el ruido también se caracteriza por su naturaleza aleatoria. Esto queda reflejado en la definición de ruido contenida en la norma UNE 21302-801:2001.Vocabulario electrotécnico:

a) *Vibración errática o estadísticamente aleatoria.*

b) *Sonido o cualquier otra perturbación acústica desagradable o indeseable.*

Los ruidos se producen en los llamados focos sonoros o fuentes, se transmiten a través de un medio (sólidos, líquidos, gases) y llegan a un receptor. El foco sonoro puede verse influenciado tanto por el medio como por el receptor y, de forma análoga, la reacción del receptor también es condicionada por el medio y la fuente.

Considerando que normalmente existen todas las frecuencias audibles con mayor o menor nivel de presión sonora, se puede descomponer el ruido considerando las diferentes frecuencias y evaluando para cada una un nivel de presión sonora obteniendo el espectro sonoro. De esta forma, se emplea el nivel de espectro de presión sonora L_{ps} que corresponde al nivel de presión sonora en una banda de 1 Hz de ancho. El nivel de presión en la banda L_{band} es el nivel de presión sonora dentro de una banda limitada por dos frecuencias f_2, f_1 siendo su ancho $f_2 - f_1$.

Espectro de frecuencias. Bandas de Octava.

Si profundizamos en lo anterior, las fuentes de ruido, tanto en edificación como en cualquier ámbito donde se produzca, son muy diversas. Además, cada una de ellas no puede considerarse como emisora de una sola frecuencia, sino como generadora de sonidos compuestos por una combinación de ondas sonoras de distintas frecuencias a diferentes intensidades. Por lo tanto, para caracterizar y evaluar de forma detallada el ruido es imprescindible conocer la contribución de cada componente de frecuencia al nivel de ruido total. Esto se consigue mediante la obtención del espectro de un sonido, que consiste en descomponerlo en las distintas frecuencias que lo constituyen y hallar el nivel de presión sonora de cada una de ellas.

Las frecuencias acústicas se agrupan en una serie de bandas que forman la distribución espectral del ruido y cuyos anchos se encuentran normalizados. La razón reside en la importancia de obtener una información manejable dado el extenso rango de frecuencias audibles. Los anchos más utilizados son los de una octava y los de 1/3 de octava. El término octava se toma de una escala musical que considera el intervalo entre dos sonidos que poseen una relación de frecuencias igual a 2 y que corresponde a ocho notas de dicha escala. En la banda de una octava se cumple que la frecuencia más alta duplica a la más baja: $f_2/f_1 = 2$. En la banda de 1/3 de octava la relación es más restrictiva siendo: $f_2/f_1 = 2^{1/3}$. A la frecuencia central (o principal) de cada banda se le asigna el nivel resultante de componer todas las frecuencias contenidas entre los límites superior e inferior del intervalo. Dentro de las mencionadas frecuencias principales, la norma UNE-EN ISO 266 especifica una serie de frecuencias preferentes con el fin de establecer una base común y así comparar los resultados de las mediciones acústicas.

2.2.1. TIPOS DE RUIDO.

Una primera clasificación de los ruidos nos permite clasificarlos respecto a dos dominios: tiempo y frecuencia.

2.2.1.1. Caracterización en frecuencia.

- Ruido blanco: Tiene la misma energía en todas las frecuencias, es por lo tanto un tipo de ruido con espectro plano.
- Ruido rosa: El nivel de energía decae a razón de 3 dB/octava. Se utiliza como señal de referencia para las medidas acústicas en las que se debe descomponer la señal en bandas de octava o fracción de octava, como en medidas de aislamiento acústico, potencia sonora, absorción acústica.
- Ruido tonal: Aquel que cuyo espectro presenta una marcada componente tonal. Mediante un análisis espectral de la señal en 1/3 de octava, si al menos uno de los tonos es mayor en 5 dBA que los adyacentes la fuente emisora tiene características tonales. Las máquinas con partes rotativas como ventiladores o motores presentan este tipo de ruido.

2.2.1.2. Caracterización temporal.

- Ruido estacionario: El nivel de presión sonora permanece constante en el tiempo. Por ejemplo el ruido que presenta una unidad de aire acondicionado.
- Ruido fluctuante: Aquel cuyo nivel de presión sonora varía, periódicamente o no.
- Ruido intermitente: Ruido solo presente en determinados instantes.
- Ruido impulsivo: Presenta impulsos cortos (aislados o repetitivos) de nivel muy superior al ruido de fondo.

Otra clasificación del ruido atiende a su forma de transmisión que determina dos grupos:

- Ruido aéreo: aquel sonido que se transmite por el aire y se propaga en los edificios a través de los cerramientos, pudiendo propagarse del exterior hacia el interior (ruido de tráfico) o entre recintos colindantes.
- Ruido de impacto: causado por pisadas, instalaciones de edificios...El sonido genera una vibración en la estructura del edificio que lo convierte en un foco sonoro. La alta rigidez de los elementos constructivos permite la transmisión de la vibración por la estructura, emitiéndose como ruido en el aire en los diferentes recintos del edificio.

2.3. DESCRIPTORES ACÚSTICOS, PARÁMETROS DE CONFORT ACÚSTICO Y FACTORES DE MÉRITO DE UN RECINTO.

2.3.1. DESCRIPTORES ACÚSTICOS.

2.3.1.1. Nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} y L_{Aeq} .

El nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} resulta una medición de especial interés cuando el sonido es fluctuante o varía con el tiempo de forma indeterminada. Se define como un nivel sonoro promedio de los niveles determinados durante un intervalo de tiempo de la medición. Se puede considerar como el nivel continuo de ruido que, permaneciendo constante, tendría la misma energía acústica que el sonido fluctuante real, para el período de tiempo considerado. Se calcula según la siguiente ecuación:

$$L_{eq}=10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^n (f_i) \cdot 10^{L_{pi}/10} \right], \text{ (dB)}$$

Siendo: L_{eq} : Nivel de presión sonora (dB) de la fuente que deseamos calcular.

n : Número de intervalos.

f_i : Fracción de tiempo transcurrida en el intervalo i

L_{pi} : Nivel de presión sonora del intervalo i

Si durante la medición se toman los valores de presión sonora corregidos en curva de ponderación A, la ecuación anterior equivale a la siguiente:

$$L_{Aeq}=10 \cdot \log \left[\frac{1}{t} \cdot \int_0^t \left(\frac{L_{pA}^t}{L_{pref}} \right)^2 \cdot dt \right], \text{ (dB)}$$

Siendo: L_{Aeq} : Nivel sonoro continuo equivalente ponderado A

t : tiempo de la medición.

L_{pA} : Nivel de presión sonora ponderada A.

L_{pref} : Presión de referencia (Pa). Se toma un valor de 2×10^{-5} Pa

A continuación se describen los descriptores acústicos de uso en la medición sonora.

2.3.1.2. Descriptores estadísticos.

L_{AN} : Nivel equivalente ponderado A excedido durante el N% del periodo de la medición. Entre los más importantes están:

L_{10} : Nivel de presión sonora excedido el 10% del tiempo. Se usa en ruido viario, como indicador del nivel de molestia del ruido.

L_{50} : Nivel de presión sonora excedido el 50% del tiempo. Normalmente es igual al nivel medio del ruido medido en el periodo de medición.

L_{90} : Nivel de presión sonora excedido el 90% del tiempo. Se denomina usualmente nivel de ruido de fondo.

2.3.1.3. Nivel sonoro día-noche: L_{DN} .

Este índice penaliza la distinta sensibilidad que tiene el ser humano al ruido en función de la hora del día en que se percibe, más molesto entre las 22.00 h y las 7.00 h. La penalización se efectúa sobre la medida en L_{Aeq} con una ponderación de 10 dB(A).

2.3.1.4. Nivel de contaminación de ruido: L_{NP} .

$$L_{NP} = L_{Aeq} + 2,56 \sigma$$

Se compone de dos términos: el primero es una medida del nivel equivalente L_{Aeq} y el segundo expresa el aumento de la molestia provocado por las fluctuaciones del nivel de presión sonora. σ se define como la desviación estándar del nivel instantáneo durante el período de medición.

2.3.1.5. Índice de ruido de tráfico: TNI.

$$TNI = 4 \cdot (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

Usa los descriptores estadísticos vistos anteriormente y se determina en curva de ponderación A. La diferencia $L_{10} - L_{90}$ constituye el índice denominado clima sonoro NC.

2.3.1.6. Nivel de exposición sonora: SEL.

Se define el nivel de exposición sonora como el nivel constante que tiene la misma energía ponderada A que el ruido que está produciendo durante el intervalo de medición, manteniendo dicho nivel constante durante un período de 1 segundo.

En definitiva, el SEL es una medida del L_{Aeq} normalizado para 1 segundo:

$$SEL = 10 \cdot \log \cdot \left[\frac{1}{t} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{L_{pA}^2}{L_{pref}^2} \right) \cdot dt \right]$$

Donde t_1 a t_2 es el intervalo de tiempo donde tiene lugar la medición.

A partir del SEL se puede obtener el nivel sonoro equivalente según la expresión:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{SEL_i/10}$$

Siendo: n: nº de sucesos de ruido que tienen lugar en el periodo de tiempo $t_2 - t_1$.
 SEL_i: Nivel de exposición al ruido del suceso i.

2.3.2. PARÁMETROS DE CONFORT ACÚSTICO Y FACTORES DE MÉRITO DE UN RECINTO.

2.3.2.1. La inteligibilidad de la palabra.

Como vimos en el recorrido histórico de la acústica aplicada a la edificación la comprensión de la palabra era una cuestión fundamental y de gran influencia en el diseño de la mayoría de recintos. En la actualidad también supone una cuestión básica en el diseño de las edificaciones, por motivos relativos a la seguridad y/o de eficacia laboral.

La inteligibilidad de la palabra para ambientes laborales se puede determinar, de manera suficiente, mediante el uso de valores PSIL (Preferred Speech Interference Level), que se define mediante los niveles de presión sonora determinadas a las frecuencias de octavas de 500, 1000 y 2000 Hz y se expresa por su valor medio:

$$PSIL = \frac{L_{p500} + L_{p1000} + L_{p2000}}{3}$$

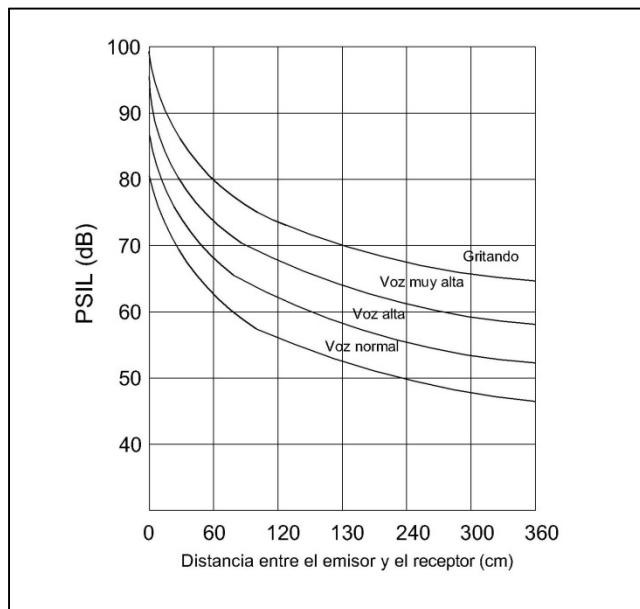


Fig. 2.4. El PSIL en función de la distancia entre emisor y receptor.

En ausencia de filtros, se puede hallar el PSIL mediante la siguiente relación empírica, siendo L_A el nivel de presión sonora en dBA:

$$PSIL \approx L_A - 7$$

La fig. 2.4 muestran las curvas desarrolladas por Beranek para evaluar el PSIL en función de la distancia entre el emisor y el receptor.

El índice de inteligibilidad, definido por STI generalmente, se obtiene a partir del tiempo de reverberación T, de la relación de la señal respecto al ruido de la sala y de los posibles ecos.

Se clasifica la inteligibilidad de la sala de la forma siguiente, definiendo el factor de mérito asociado a ella.

- Mala: $0 < STI < 0,30$
- Regular: $0,30 < STI < 0,45$
- Aceptable: $0,45 < STI < 0,60$
- Buena: $0,60 < STI < 0,75$
- Excelente: $0 < STI < 1$

Tabla 2.2. Factor de mérito para un valor dado de STI.

M_{TSL}	STI
0	$0 \leq STI \leq 0,3$
$2,22 STI - 0,67$	$0,3 \leq STI \leq 0,75$
1	$STI > 0,75$

2.3.2.2. Criterios de confort acústico interior.

Como se desarrollará en el Capítulo 3, durante los últimos años la preocupación por el confort acústico dentro de viviendas y edificios públicos ha ido en aumento, atendiendo a razones de bienestar social por parte de las entidades públicas y a razones técnicas por parte de especialistas con el fin de hallar los criterios ideales de confort acústico interior. Éste depende decisivamente de los niveles de ruido de fondo existentes en el interior de un recinto y dada la variedad y disparidad de los mismos, supone una dificultad en la práctica del control del ruido.

Existen diferentes métodos para evaluar el confort acústico en actividades realizadas en interiores con un ruido de fondo más o menos estable, algunos de los más conocidos son:

- Curvas NC (Noise Criteria).
- Curvas NR (Noise Rating).
- Curvas PNC (Preferred Noise Criteria).

Todos ellos se encuentran caracterizados por un representación gráfica de curvas, o familiar de curvas, que establece los niveles de presión sonora en decibelios, para cada cada frecuencia central de bandas de octava, que se recomienda no superar para conseguir una situación de confort acústico.

Las curvas NC fueron publicadas por Leo Leroy Beranek en 1957 y han tenido mucha aceptación en el campo de las ingenierías. Este sistema es, normalmente, el método de valoración del ruido en los sistemas de aire acondicionado. Sin embargo, son las curvas NR, desarrolladas por Korsten y Van Os en 1962 y ratificadas en la norma ISO R 1996, las que se utilizan comúnmente. Ambos sistemas se desarrollaron de modo que las pendientes de sus curvas fueran similares a los contornos de igual sonoridad del oído humano pero tienen el inconveniente de que no pueden igualar el espectro sonoro de lo que subjetivamente nos gustaría oír y los espectros que cumplieran aproximadamente las curvas NC y NR no tendrían naturaleza neutra. Para corregir el error, en el año 1971, Beranek desarrolla las curvas PNC, que representa los niveles de ruido de fondo que la gente está acostumbrada a oír.

Las tablas 2.3, 2.4, y 2.5 contienen la representación gráfica de las mencionadas curvas y los valores recomendados de los índices correspondientes en función del recinto.

Tabla 2.3. Representación gráfica de las curvas NR y valores recomendados del índice NR para diferentes locales.

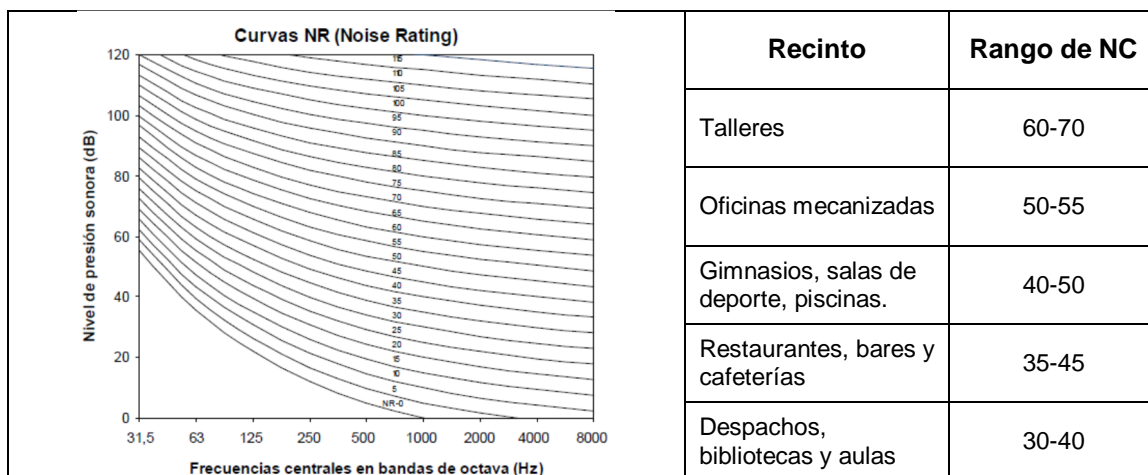


Tabla 2.4. Representación gráfica de las curvas NC y valores recomendados del índice NC para diferentes locales.

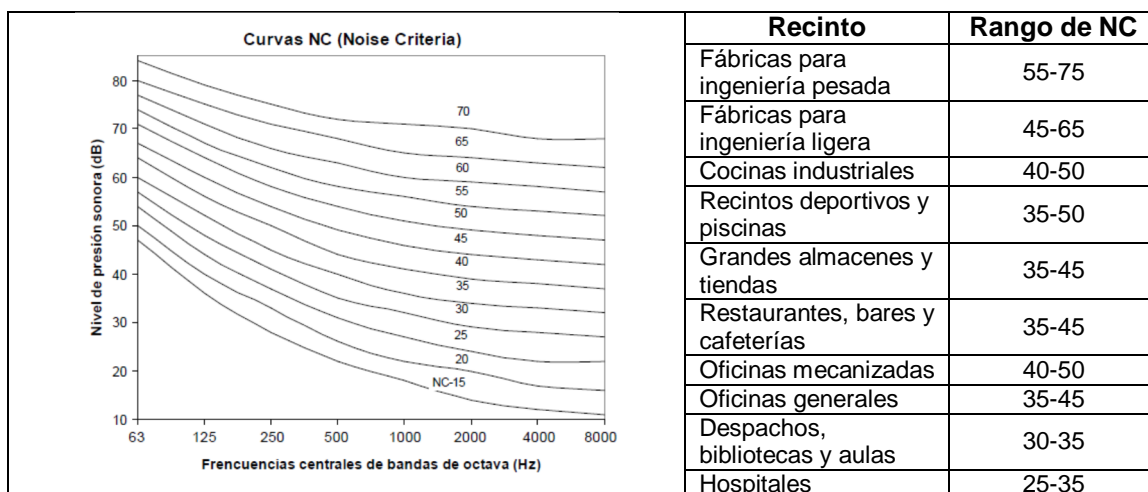
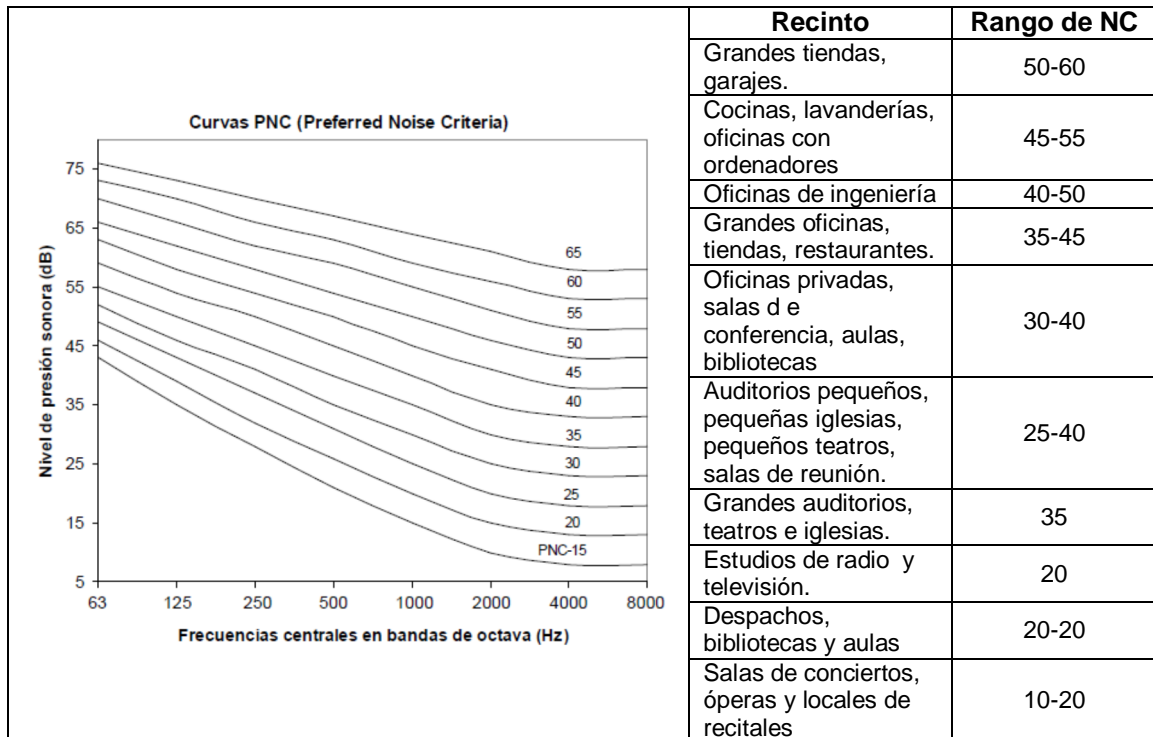


Tabla 2.5. Representación gráfica de las curvas PNC y valores recomendados del índice PNC para diferentes locales.



2.3.2.3. Otros parámetros acústicos y factores de mérito de un recinto.

Respuesta impulsional.

Este concepto se define como el comportamiento de una sala a un estímulo sonoro, en forma de señal impulsional, función delta o señal de duración muy breve y de amplitud elevada. Cada representación de la respuesta impulsional muestra la amplitud de la energía sonora en mPa en función del tiempo en ms. Las mediciones se realizan en la sala vacía, caso más desfavorable en la producción de reflexiones indeseables. La importancia de la respuesta impulsional radica en que de ella se pueden obtener la mayoría de los parámetros que se relatan a continuación.

Reflexiones y ecos.

De la respuesta impulsional se deducen las reflexiones indeseables que se producen en un recinto, en especial aquellas que se consideran como eco y se representa logarítmicamente mediante un ecograma.

$$\text{Ecograma (t)} = 10 \cdot \log \frac{h^2(t)}{h_{\max}^2} = 20 \cdot \log \frac{h(t)}{h_{\max}}$$

El valor máximo está normalizado por lo que todos los valores representados en un ecograma son inferiores a 0 dB. Para cada reflexión, estos valores indican el desnivel (d) respecto al sonido directo. Por lo tanto, el ecograma

representa la energía sonora relativa al sonido directo (en dB) en función del tiempo (en ms).

El criterio acústico es muy estricto y depende del uso de la sala, así, se consideran perjudiciales las reflexiones que lleguen con un retardo mayor respecto al sonido directo ($t_r - t_d$) a los siguientes tiempos: 80 ms para música, 60 ms para ópera y 50 ms para palabra.

El factor de mérito definido por los ecogramas penaliza las reflexiones producidas más allá de los límites temporales indicados anteriormente.

Tabla 2.6. Factor de mérito para un eco.

Mecograma	d
1	$d \leq 0$
$(10 - d) / 10$	$0 < d < 10$
0	$d \geq 10$

Tiempo de retardo inicial del sonido: ITDG.

Del ecograma también se obtiene el ITDG (Initial Time Delay Gap) correspondiente a un punto de un recinto que se define como el intervalo existente entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa en dicho punto, considerando las bandas de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz. El ITDG (ver fig. 2.5) se corresponde con la impresión subjetiva de intimidad sonora, según Beranek. La intimidad sonora indica el grado de identificación del oyente y la fuente sonora.

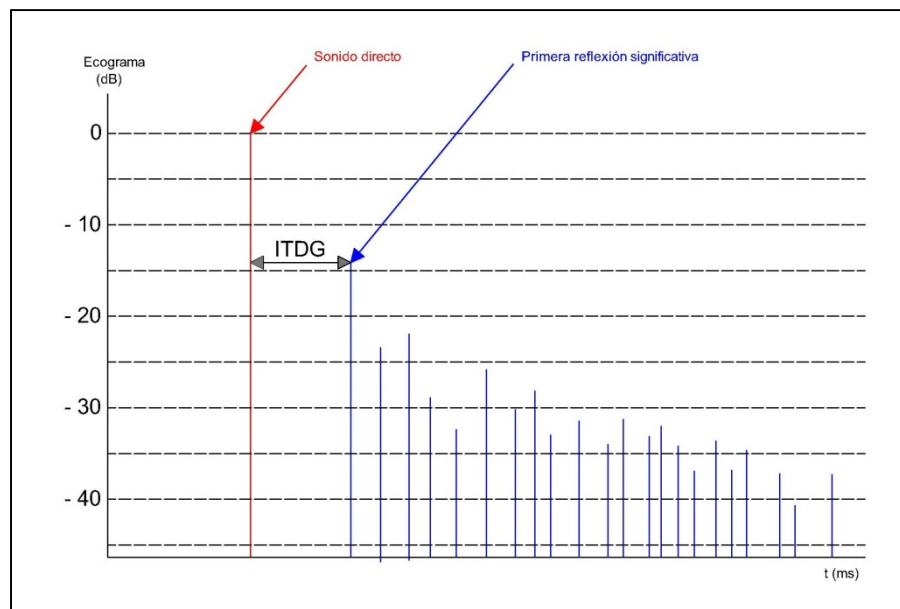


Fig. 2.5. Obtención del ITDG a partir del ecograma.

Tabla 2.7. Factor de mérito para un valor dado de ITDG.

$M_{\text{intimididad}}$	$ITDG$
1	$0 < ITDG < 10$
$2 - ITDG / 10$	$20 < ITDG < 40$
0	$ITDG \geq 10 \text{ ms}$

Tiempo de reverberación: T.

El tiempo de reverberación se define como el tiempo en segundos que transcurre desde que el foco emisor se para, hasta que el nivel de presión sonora establecido en la sala haya disminuido en 60 dB. Una sala con un T elevado se denomina viva mientras que, por el contrario, un T bajo califica la sala como apagada.

Tabla 2.8. Factor de mérito para un valor dado de T_{mid} en función de T_{opt} .

$M_{T_{\text{mid}}}$	T_{mid}
0	$T_{\text{mid}} \leq 0,9 T_{\text{opt}} - 0,5$
$1 - (1,8T_{\text{opt}} - 2T_{\text{mid}})$	$0,9T_{\text{opt}} - 0,5 < T_{\text{mid}} < 0,9T_{\text{opt}}$
1	$0,9T_{\text{opt}} - 0,5 \leq T_{\text{mid}} \leq T_{\text{opt}}$
$1 - 2 (T_{\text{mid}} - T_{\text{opt}})$	$T_{\text{opt}} < T_{\text{mid}} < T_{\text{opt}} + 0,5$
0	$T_{\text{mid}} \geq T_{\text{opt}} + 0,5$
Siendo: T_{opt} : Valor óptimo de T indicado por el criterio acústico. T_{mid} : Valor medio de los valores de T de 500 y 1000 Hz	

Brillo y calidez.

Los parámetros brillo y calidez se obtienen a partir de T y dan una idea de la respuesta a baja y a alta frecuencia de la sala. La palabra calidez, en el léxico acústico representa la riqueza de baja frecuencia y la suavidad y la melosidad de la música en la sala. Para su medición de manera objetiva se suele utilizar la relación entre el valor medio de T a frecuencias graves (125 Hz y 250 Hz), T_{low} , y el valor medio del T a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz), T_{mid} :

$$I_{\text{calidez}} = \frac{T(125 \text{ Hz}) + T(250 \text{ Hz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} = \frac{T_{\text{low}}}{T_{\text{mid}}}$$

El criterio acústico fija como valor óptimo para salas destinadas a música una calidez de 1,2 y para teatro 1,1. Así pues se definen dos factores de mérito para la calidez según el uso de la sala:

Tabla 2.9. Factor de mérito para un valor dado de I_{calidez} según el uso de la sala.

Uso de la sala	M_{calidez}	I_{calidez}
Musical	0	$I_{\text{calidez}} \leq 0,85$
	$4I_{\text{calidez}} - 3,4$	$0,85 < I_{\text{calidez}} < 1,1$
	1	$1,1 \leq I_{\text{calidez}} \leq 1,3$

(Continúa)

	$6,2 - 4I_{calidez}$	$1,3 < I_{calidez} < 1,55$
	0	$I_{calidez} \geq 1,55$
Teatro	0	$I_{calidez} \leq 0,65$
	$4I_{calidez} - 2,6$	$0,65 < I_{calidez} < 0,9$
	1	$0,9 \leq I_{calidez} \leq 1,3$
	$6,2 - 4I_{calidez}$	$1,3 < I_{calidez} < 1,55$
	0	$I_{calidez} \geq 1,55$

Del mismo modo, si una sala es brillante, presenta una buena respuesta a las frecuencias altas y el sonido en ella es claro y rico en armónicos. Se calcula por la relación entre el valor medio de los T a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz), T_{high} , y el T_{mid} :

$$I_{brillo} = \frac{T(2\text{ kHz}) + T(4\text{ kHz})}{T(500\text{ Hz}) + T(1\text{ kHz})} = \frac{T_{high}}{T_{mid}}$$

Se busca que el valor de este parámetro sea el más alto posible y en ningún caso inferior a 0,8. Se define un factor de mérito apto para música y teatro.

Tabla 2.10. Factor de mérito para un valor dado de I_{brillo}

M_{brillo}	I_{brillo}
0	$I_{brillo} \leq 0,45$
$2,86I_{calidez} - 1,29$	$0,45 < I_{brillo} < 0,8$
1	$0,8 \leq I_{brillo} \leq 1$
$3,857 - 2,86I_{calidez}$	$1 < I_{brillo} < 1,35$
0	$I_{brillo} \geq 1,35$

Tiempo de reverberación inmediato.

Se define el EDT (Early Decay Time) como el tiempo, en segundos, que transcurriría desde que el foco emisor deja de emitir sonido, hasta que el nivel de presión sonora hubiera disminuido en 60 dB, calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de caída. Generalmente, la pendiente de esa zona puede ser más corta o más larga que la caída correspondiente a 10 dB, por lo que se denomina el T asociado a esa pendiente, tiempo de reverberación inmediato T_i que se ajusta más al fenómeno real.

En el supuesto ideal de una sala con difusión homogénea del sonido los valores de T y EDT son iguales ya que la caída de nivel de presión sonora es lineal. En la realidad la distribución de la absorción de los recintos no es homogénea y los valores de EDT son generalmente menores.

La impresión subjetiva de reverberación está más relacionada con el EDT que con el T por lo que una sala con unos EDT menores que los T la música sonará más apagada pero más inteligible para la voz. En el caso de los teatros resulta adecuado un valor de EDT_{mid} entre $0,6T_{mid}$ y $0,75T_{mid}$, para óperas entre $0,75T_{mid}$ y T_{mid} , y para salas de conciertos entre $0,9T_{mid}$ y T_{mid} . Las relaciones de mérito según la sala son las siguientes:

Tabla 2.11. Factor de mérito para un valor dado de EDT_{mid}/T_{mid} según el uso de la sala.

Uso de la sala	$M_{calidez}$	$I_{calidez}$
Conciertos	0	$EDT_{mid} \leq 0,4T_{mid}$
	$2(EDT_{mid}/T_{mid}) - 0,8$	$0,4T_{mid} < EDT_{mid} < 0,9T_{mid}$
	1	$0,9T_{mid} < EDT_{mid} \leq T_{mid}$
	EDT_{mid}/T_{mid}	$EDT_{mid} > 1,55$
Ópera	0	$EDT_{mid} \leq 0,4T_{mid}$
	$2(EDT_{mid}/T_{mid}) - 0,5$	$0,25T_{mid} < EDT_{mid} \leq 0,75T_{mid}$
	1	$EDT_{mid} > T_{mid}$
Teatros	0	$EDT_{mid} \leq 0,35T_{mid}$
	$4(EDT_{mid}/T_{mid}) - 1,4$	$0,35T_{mid} < EDT_{mid} < 0,6T_{mid}$
	1	$0,6T_{mid} < EDT_{mid} \leq 0,75T_{mid}$
	$1,75 - (EDT_{mid}/T_{mid})$	$EDT_{mid} > 0,75$

Índice de definición: D_{50} .

El índice de definición se expresa mediante la siguiente relación matemática:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t)}{\int_0^{\infty} p^2(t)} 100 \%$$

Donde $p(t)$ es el valor de la presión sonora instantánea en el punto receptor. Un valor bajo de definición implica que la energía sonora reflejada se produce dentro de los 50 ms, después de la llegada del sonido directo, es pequeña en relación a la energía sonora reflejada total que alcanza el punto receptor. Así pues, una sala con un índice de definición pequeño se percibe como poco íntimo y normalmente se debe a un exceso de tiempo de reverberación.

Una sala dedicada a conciertos debe presentar un índice de definición interior a 0,5 (50 %). Si éste aumenta, quiere decir que la sala se halla mejor preparada para la expresión hablada, por lo que en teatros o salas de conferencia se busca un valor superior a 0,65. Las óperas constituyen una situación intermedia a los dos supuestos anteriores y el valor preferible de definición debe estar entre 0,5 y 0,65. Se establecen las siguientes magnitudes de méritos en función de la sala.

Tabla 2.12. Factor de mérito para un valor dado de D .

Uso de la sala	M_{def}	D
Conciertos	$D/0,45$	$D \leq 0,45$
	1	$0,45 < D \leq 0,6$
	$2,2 - 2D$	$D > 0,6$
Ópera	0	$D \leq 0,25$
	$4D - 1$	$0,25 < D \leq 0,5$
	1	$0,5 < D \leq 0,65$
Teatros	$1,93 - 1,45D$	$D > 0,65$
	0	$D \leq 0,45$
	$5D - 2,25D$	$0,45 < D \leq 0,6$
	1	$D > 0,65$

Índice de calidad: C_{80} .

En índice de claridad, expresado en dB, da información en términos logarítmicos, de la cantidad de energía sonora inmediata que se produce dentro de los primeros 80 ms respecto a la energía sonora tardía que se produce después de transcurridos los 80 ms. Se expresa matemáticamente mediante la siguiente relación:

$$C_{80} = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Con un índice de claridad alto la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía y dentro de los primeros 80 ms se producirán muchas más reflexiones que provienen de paredes o techos próximos al oyente que reflexiones generales debidas a restantes superficies de la sala.

Los intervalos entre los que se debe hallar el índice de claridad óptimo para los distintos usos de una sala son los siguientes:

Salas de conciertos: $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$

Salas de óperas: $2 \text{ dB} < C_{80} < 6 \text{ dB}$

Salas de teatro: $C_{80} > 6 \text{ dB}$

Se definen del mismo modo los valores de mérito:

Tabla 2.13. Factor de mérito para un valor dado de C_{80} .

Uso de la sala	$M_{C_{80}}$	D
Conciertos	0	$C_{80} \leq -9$
	$1,62 + 0,18 C_{80}$	$-9 < C_{80} \leq -4$
	$1,10 + 0,05 C_{80}$	$-4 < C_{80} \leq -2$
	1	$-2 < C_{80} \leq 4$
	$1,6 - 0,16 C_{80}$	$4 < C_{80} \leq 10$
	0	$C_{80} \geq 10$
Ópera	0	$C_{80} \leq 0$
	$C_{80}/2$	$0 < C_{80} \leq 2$
	1	$2 < C_{80} \leq 6$
	$2 - C_{80}/6$	$6 < C_{80} \leq 12$
	0	$C_{80} > 12$
Teatros	0	$C_{80} \leq 0$
	$C_{80}/6$	$0 < C_{80} \leq 6$
	1	$C_{80} > 6$

Nivel total de sonido L_t (10).

El nivel total de sonido (Total Sound Level o Strenght) se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente cualquiera en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora

producido por una fuente omnidireccional de la misma potencia situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m de la fuente. Ambos niveles se miden en bandas de octava (desde 125 Hz a 5 kHz). El valor de L_t (10) se corresponde con la impresión de sonoridad de la sala y depende de la distancia al escenario, de la energía de las primeras reflexiones y en mayor medida del EDT.

Se recomiendan unos valores de L_t (10) siempre superiores a 10 dB. Se define el factor de mérito asociado independientemente del uso de la sala.

Tabla 2.14. Factor de mérito para un valor dado de L_t (10).

M_{TSL}	L_0
0	$(L - L_0) \leq -10$
$1 + (L - L_0)/10$	$-10 \leq (L - L_0) \leq 0$
0	$(L - L_0) \geq 0$

Factor de mérito global.

El factor de mérito global se obtiene hallando la media aritmética de todos los factores de mérito resultantes de la evaluación de la sala.

$$FM_{GLOBAL} = \sum_{i=1}^n \frac{FM_i}{n}$$

El valor de FM_{GLOBAL} se compara con los FM_{MIN} obtenidos según los criterios considerados. Si se observa que la desviación existente entre ellos y la media fuera superior a 0,2 para valores de FM_{GLOBAL} inferiores a 0,8 se procedería a revisar la acústica del recinto para modificar los criterios perjudiciales de la misma.

2.4. INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA.

A grandes rasgos, una medición acústica debe contener las siguientes fases:

- Conocimiento del objetivo final de la medición.
- Conocimiento de la fuente sonora y los parámetros acústicos que la definan.
- Elección de la instrumentación necesaria y adecuada.
- Aplicación adecuada de la instrumentación.

El conocimiento de la instrumentación acústica permite su correcta elección para cada caso determinado, ya sea una medida en laboratorio o de campo. A continuación se explican brevemente los instrumentos de medición acústica más utilizados.

2.4.1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

2.4.1.1. Sonómetro.

El sonómetro o decibelímetro es un aparato que mide la presión acústica, incluyendo filtros de ponderación con el objeto de conseguir una respuesta frecuencial similar a la del oído humano que corresponde con las curvas de ponderación vistas en el apartado 2.1.4.

Componentes.

Micrófono. Es un transductor encargado de transformar las variaciones de presión sonora en señales eléctricas proporcionales, de características más cómodas y fiables a la hora de medir y procesar. De la calidad de esta transformación depende la precisión del sistema de medida, por lo que se considera el componente principal de los sonómetros.

La elección del tipo de micrófono depende tanto de condiciones ambientales (humedad, temperatura, etc.) como de condicionantes acústicos (frecuencia del micrófono, el margen dinámico o su estabilidad). También es fundamental conocer qué tipo de campos se van a medir, ya que existen micrófonos preparados para medir uno u otro los cuales se definen de la siguiente manera:

- Campo sonoro difuso: el sonido procede de todas las direcciones y se denomina de incidencia aleatoria.
- Campo libre: el sonido procede de una sola dirección y se denomina de incidencia normal.

Amplificador. Amplifican la señal del micrófono lo suficiente como para permitir la medida de los niveles más bajos de presión sonora y mantienen la amplificación constante.

Filtros y rectificador. Conjunto de filtros eléctricos cuya respuesta simula la respuesta auditiva humana. Compensa la diferencia de sensibilidad del oído humano para las distintas frecuencias audibles. Los sonómetros incorporan tres características de respuesta, las ponderaciones A, B, C y D.

Tras el filtrado la señal se amplifica de nuevo y pasa por un rectificador, obteniéndose una señal proporcional a los picos de presión sonora.

Detector eficaz. Una vez la señal ha atravesado la red ponderada apropiada, debe ser procesada para alimentar al sistema indicador o de presentación de datos. Esto se realiza mediante un detector eficaz que rectifica la señal para obtener su valor eficaz (RMS) y convierte sus amplitudes lineales en logarítmicas.

Para evitar diferencias de lecturas sobre señales sonoras idénticas, los períodos de promediación o constantes de integración están unificados por

varias normativas europeas. En Europa se rigen por la CEI 651/804 y son las siguientes:

- Lento (Slow): promediación de 1 s. Se usa cuando la señal fluctúa ampliamente.
- Rápido (Fast): promediación de 125 ms. Se usa para medir ruidos continuos.
- Impulso (Impulse): promediación de 35 ms en subida y 1500 ms en bajada. Se usa para medir señales transitorias desde el punto de vista de sensación sonora en el oído humano y señales impulsivas.

En ocasiones es necesario recurrir a constantes de tiempo más rápidas que las antes citadas y se usan rectificadores de valor de pico (peak) con tiempos de subida de 50 ms.

Los modelos de sonómetro actuales permiten incluir procedimientos de integración temporal en largos periodos. Son los llamados sonómetros integradores los cuales calculan el nivel de presión sonora equivalente A, L_{Aeq} que asimila un ruido muy fluctuante, dentro de un intervalo de medición considerado, a un ruido estable de la misma energía ponderada.

Indicador: Una vez la señal ha sido amplificada, modificada por la ponderación de frecuencia y promediada en el tiempo, se muestra visualizada en el indicador, de forma analógica o digital.

La fig. 2.6 ilustra de forma esquemática los componentes y funcionamiento de un sonómetro.

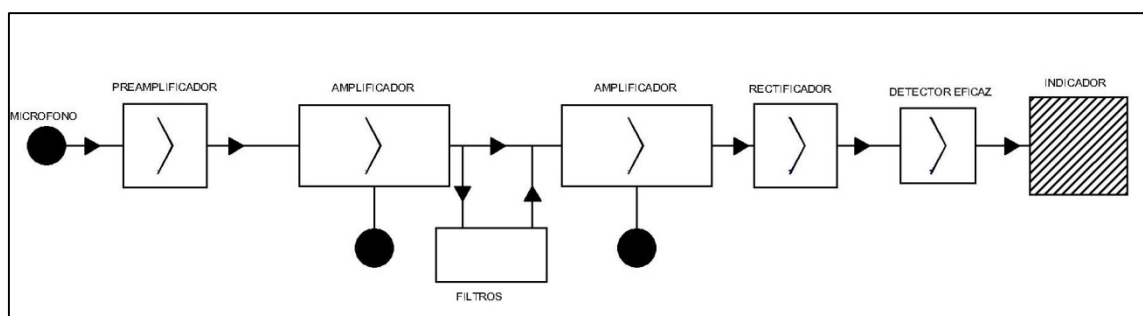


Fig. 2.6. Esquema de funcionamiento de un sonómetro.

Tipos de sonómetro.

Los sonómetros se clasifican según su grado de precisión en 4 clases:

- Tipo 0: muy preciso. Utilizado en laboratorios para obtener valores de referencia.
- Tipo 1: precisión alta. Utilizado para mediciones en terreno.

- Tipo 2: precisión media. Utilizado para mediciones generales.
- Tipo 3: precisión baja. Utilizado en labores de reconocimiento y mediciones aproximadas.

2.4.1.2. Dosímetro.

El dosímetro es un instrumento de uso muy extendido a la hora de evaluar la exposición de un trabajador al ruido. Es un pequeño sonómetro integrador que permite calcular la dosis de ruido a la que está sometida una persona. El manual de procedimiento de evaluación del ruido elaborado por el Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo define dosis de ruido como: *“cantidad de ruido recibida por un trabajador, que se expresa generalmente como un % de la dosis máxima (100%)”*

2.4.1.3. Espectrómetro.

Un filtro es un dispositivo electrónico que impide la lectura de cualquier otra frecuencia que no se encuentre entre el intervalo que determinan dos valores de corte (uno superior y otro inferior). Como se desarrolló en el apartado 2.2 en acústica se utilizan los filtros de octava o los de tercios de octava. Por lo tanto un espectrómetro es un equipo que posee un conjunto de filtros donde las frecuencias centrales se escalonan con las frecuencias normalizadas.

2.4.1.4. Calibrador.

Instrumento que sirve para asegurar la fiabilidad de los sonómetros. Su misión es generar un tono estable de nivel a una frecuencia predeterminada y se ajusta la lectura del sonómetro haciéndola coincidir con el nivel patrón generado por el calibrador. En general, disponen de un selector que permite generar uno o más tonos a una frecuencia de 1 kHz, ya que en relación a la curva de ponderación A no tiene ni atenuación ni ganancia.

2.4.1.5. Analizador de Fourier (FFT.).

Es un analizador numérico constituido por un micrófono y un amplificador analógico. Su funcionamiento está basado en la obtención del espectro de una señal mediante un algoritmo de cálculo denominado transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform). Este algoritmo permite calcular la transformada discreta de Fourier de cualquier señal con una reducción muy notable de operaciones aritméticas, y el consiguiente ahorro de tiempo de cálculo. Para el análisis del sonido dispone de filtros numéricos normalizados en bandas de octava y tercios de octava. Se utilizan cuando se requiere un análisis rápido y de banda de frecuencia más fina.

2.4.1.6. Registradores.

Los registradores son aparatos portátiles que permiten guardar la señal sonora detectada para su posterior estudio y comprobación, especialmente cuando se

precisa realizar trabajos fuera del laboratorio o cuando el suceso que se pretende medir no es fácilmente reproducible. Son de uso frecuente los registradores magnéticos, que presentan uniformidad en la respuesta en frecuencias, gran rango dinámico y fluctuaciones mínimas de velocidad de registro y de reproducción. Es recomendable la adecuada compatibilidad entre el sonómetro y el registrador para que no se vea afectada la medición realizada.

2.5. AISLAMIENTO ACÚSTICO Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

Los términos aislante y absorbente, desde el punto de vista acústico son empleados por frecuencia en esta disciplina y por extensión a la acústica aplicada a la edificación. Estos conceptos son utilizados indistintamente cuando no debería ser así con lo que es conveniente aplicarlos con criterio.

Un material aislante impide la propagación de la energía acústica incidente reflejándola casi en su totalidad, mientras que el absorbente disipa parte de esa energía transformándola en energía calorífica. El aislamiento acústico, por lo tanto, proporciona una protección al recinto contra la penetración del ruido y evita que el sonido salga al exterior del mismo. La absorción acústica por su parte pretende mejorar la acústica del recinto, es lo que se llama acondicionamiento acústico.

El siguiente gráfico ilustra los conceptos de la absorción acústica donde parte de la energía incidente (E_i) es reflejada (E_r), otra parte es absorbida por el material (E_a) y otra parte es transmitida (E_t), cumpliéndose siempre que $E_i = E_r + E_a + E_t$ (ver fig. 2.7).

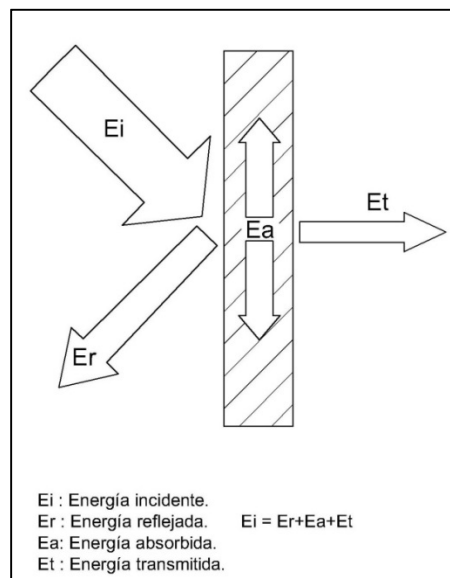


Fig. 2.7. Absorción acústica.

2.5.1. AISLAMIENTO ACÚSTICO.

Los factores intervinientes en un aislamiento acústico adecuado son los siguientes:

- Factor másico. El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: se consigue una mayor atenuación por resistencia al choque de la onda sonora cuanto mayor sea la masa de los elementos constructivos.
- Factor multicapa. Es frecuente la utilización de elementos constructivos constituido por varias capas y una disposición adecuada de ellos supone una mejora del aislamiento acústico superior a lo que supondría la suma de cada capa. Esto se explica de la forma siguiente: cada capa, dependiendo de su espesor y material tiene una frecuencia de resonancia. Al disponer dos capas del mismo material y diferente espesor la frecuencia que deje pasar el exceso la primera capa será absorbida por la segunda.
- Factor de disipación. La interposición entre dos capas que conforman un elemento constructivo de un material absorbente mejora el aislamiento acústico. El más utilizado en las soluciones constructivas actuales es la lana de roca.

2.5.1.1. Aislamiento acústico a ruido aéreo.

- Como quedó definido en el punto 2.1 se llama ruido aéreo a aquel sonido que se transmite por el aire y se propaga en los edificios de interior a exterior o entre recintos colindantes a través de los cerramientos de los mismos (ver fig. 2.8).

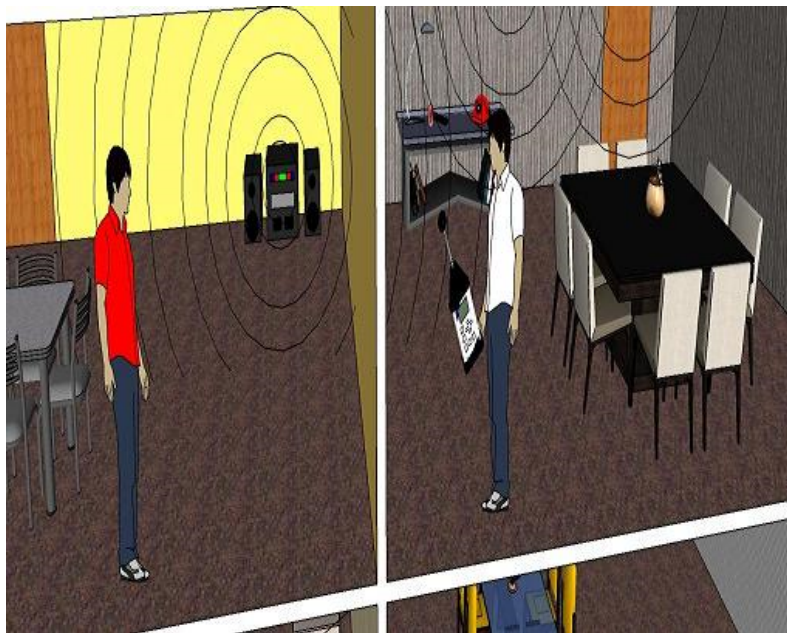


Fig. 2.8. Presencia de ruido aéreo en vivienda.

La colocación una barrera entre dos locales para obtener un aislamiento adecuado al ruido aéreo se puede realizar por dos vías:

- Vía directa: debido a la porosidad, fisuras o intersticios. No obstante, el ruido transmitirse por otras vías que no sea la directa como las llamadas vías secundarias: conductos de ventilación, rejillas...
- Efecto diafragma o membrana: Las ondas incidentes hacen vibrar el elemento constructivo que transmite su deformación al aire del espacio adyacente.

Con estos preceptos, el aislamiento acústico a ruido aéreo se consigue evitando que el medio transmisor del ruido (en este caso el aire) circule libremente mediante la interposición de barreras, pantallas, paredes que impidan la visión directa entre emisor y receptor. También es importante un aumento de la masa del paramento o pared de separación. Como indica la ley de masa: a mayor masa se consigue mayor aislamiento.

No obstante la mayoría de las veces no es suficiente el aumento de masa para la obtención de un buen aislamiento a ruido aéreo dado el comportamiento que presentan los paramentos verticales a flexión. A menos frecuencia, mayor longitud de onda y por lo tanto mayor efecto diafragma.

Resumiendo, el objetivo del aislamiento a ruido aéreo es que las ondas sonoras pierdan la mayor energía posible al atravesar el cerramiento. El valor del aislamiento a ruido aéreo se puede expresar de tres formas:

- en forma gráfica; representando el aislamiento (R en dB) en función de la frecuencia (F en Hz)
- en forma tabulada; dando valores de frecuencias y aislamiento
- mediante un único valor (R_w en dB)

El aislamiento a ruido aéreo se expresa en dBA y depende de los siguientes parámetros:

R_A = Índice global de reducción acústica de un elemento. Se mide en laboratorio y al aumentar su valor mejora el aislamiento.

D_{nTA} = Diferencia de presión acústica entre recintos interiores. Se mide in situ y al aumentar su valor mejora el aislamiento.

$R_{2m,n,T,Atr}$ = Diferencia de presión acústica en fachadas y cubiertas a ruido exterior de tráfico y aeronaves. Se mide in situ y cuanto mayor es su valor mejor aislamiento se obtiene.

2.5.1.2. Sistemas constructivos y aislamiento a ruido aéreo.

Los cerramientos se comportan de dos formas frente a la energía acústica:

- Cerramientos acústicamente estáticos: Los cerramientos oponen su inercia mecánica a la energía acústica de forma que presentan oposición a entrar

en vibración. En esta clasificación se encuentran las paredes simples y las paredes dobles rígidas que actúan bajo el principio de la Ley de Masa.

- Cerramientos acústicamente dinámicos: Los cerramientos oponen su capacidad para actuar bajo el principio de elasticidad a la energía acústica, amortiguándola y transformándola en energía mecánica de deformación. Bajo este principio actúan los cerramientos dobles ligeros o los cerramientos pesados con trasdosados ligeros que actúan bajo el principio de la Ley Masa-Muelle-Malla.

Antes de profundizar en el comportamiento de los diferentes cerramientos conviene definir dos conceptos importantes:

Efecto de coincidencia: de un panel o partición, es un fenómeno que se produce cuando la longitud de onda de una onda de flexión en un panel es igual a la de la onda de la misma frecuencia transmitiéndose por el aire.

Frecuencia de coincidencia o frecuencia natural: frecuencia a la que tiende a vibrar libremente el panel o partición cuando es excitado por una onda sonora. Es función del tipo de material y de su espesor.

Frecuencia crítica: frecuencia más baja a la que se produce el efecto de coincidencia.

Cerramientos simples.

Se considera cerramiento simple el formado por una capa de material o por varias capas unidas rígidamente entre sí de forma que ante una vibración acústica se comporta como un solo cuerpo vibratorio (ver fig. 2.9).

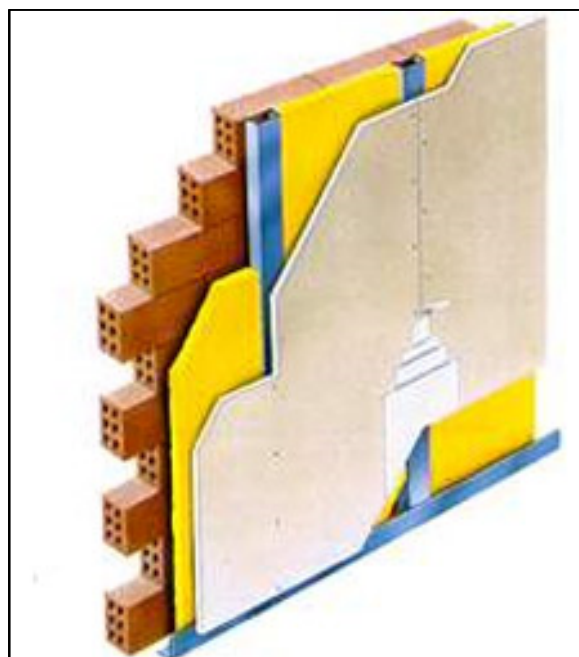


Fig. 2.9. Aislamiento acústico de cerramiento simple.

La frecuencia natural se puede estimar con la siguiente expresión:

$$F_c = \frac{C^2}{1,8 \cdot C_L \cdot d}$$

Donde C_L es la velocidad de propagación del sonido en el material, C es la velocidad de propagación del sonido en el aire y d es el espesor del paramento.

El objetivo es que las frecuencias críticas se aparten de las bajas y medias frecuencias, perjudiciales desde el punto de vista del aislamiento. En materiales como el ladrillo o el hormigón esto se consiguen aumentando el espesor mientras que en vidrios y placas de yeso para alcanzar altas frecuencias es necesaria disminuirlo.

Las paredes dobles rígidas se comportan según este mismo principio.

Cerramientos dobles de dos hojas ligeras.

Un cerramiento formado por dos hojas simples separadas entre sí (ver fig. 2.10) consigue un aislamiento acústico mayor que el que proporcionaría una pared de una hoja con la misma masa por unidad de superficie que la resultante de la suma de las dos hojas simples. Esto se explica por la Ley de Masa-Muelle-Masa: al incidir una onda sonora sobre una de las hojas, esta entra en movimiento y le transmite el movimiento al aire contenido en la separación de ambas hojas, actuando como transmisor de la energía sonora a la otra hoja y actuando además como elemento amortiguador disipando en forma de calor parte de la energía sonora.



Fig. 2.10. Aislamiento acústico de cerramiento doble.

De esta forma la energía que llega a la segunda hoja es inferior a la que incide sobre la primera hoja.

Se define por la siguiente expresión la frecuencia natural del sistema constructivo:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$

Donde s' es la rigidez dinámica del elemento de relleno y m_1 y m_2 son las masa por unidad de superficie de cada una de las hojas.

La expresión nos permite ver que la elasticidad del aislante es un parámetro determinante en la posición de la frecuencia natural para que el sistema sea eficaz. Otro factor a tener en consideración es la porosidad del material de relleno que amortigüe las ondas acústicas cuando lo atraviesen evitando un posible efecto de amplificación acústica que pueda presentar la cámara de aire.

Los sistemas de trasdosados se comportan de esta misma forma.

2.5.1.3. Aislamiento a ruido de impacto.

Los ruidos de impacto son originados por golpes y choques sobre superficies o elementos (ver fig. 2.11) que transmiten el ruido en forma de vibración. Toda perturbación directa sobre un paramento, vertical u horizontal se traduce en una transformación energética. Como consecuencia del impacto, la energía cinética del movimiento se convierte en energía vibratoria, energía acústica y disipación térmica. El choque se manifiesta de inmediato por el ruido de impacto produciendo una vibración en el elemento receptor del golpe, el cual genera un ruido aéreo.

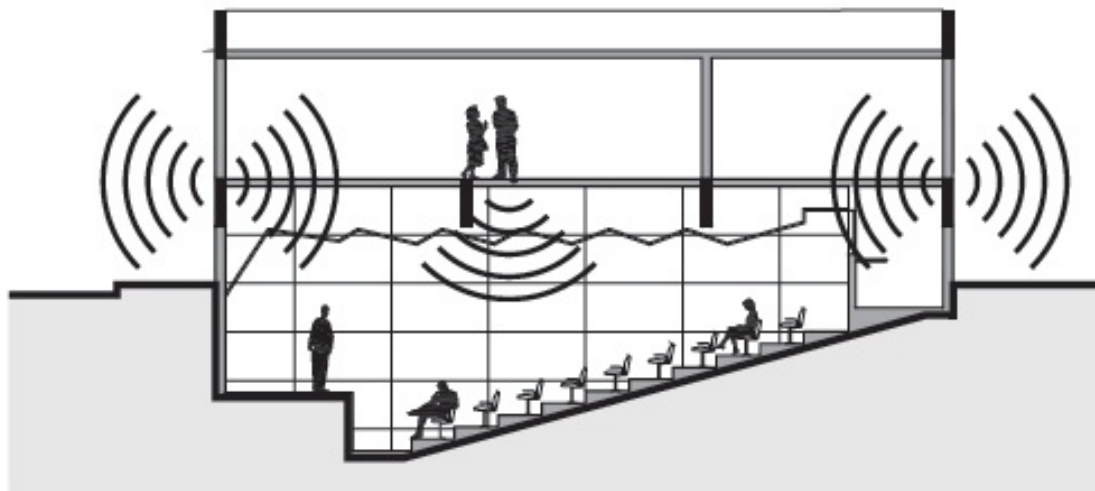


Fig. 2.11. Presencia de ruido de impacto en recinto público.

Como ocurría con el ruido aéreo, el ruido por impacto se transmite por las vías que presente menos oposición a su paso. En edificación las fuentes de ruido derivadas de la ocupación y utilización de los servicios e instalaciones se denominan fuentes de ruido internas, entre las que se pueden citar: instalaciones (fontanería, salubridad, aire acondicionado, electricidad,

transporte vertical), pisadas y ruidos domésticos en general... De esta forma las fuentes internas dependiendo de su ligazón con los elementos estructurales comunican gran parte de su energía que se propaga sin atenuación produciendo niveles elevados de ruido.

Sintetizando lo anterior, para obtener un correcto aislamiento acústico a ruido de impacto el objetivo es cortar el camino de transmisión de vibraciones mediante la interposición de materiales elásticos. Se tendrán en cuenta los siguientes factores:

- Características de la fuente de ruido.
- Estructura del suelo.
- Tipo de revestimiento o acabado del suelo.

Los parámetros que definen el aislamiento a ruido de impacto son los siguientes:

- L_{nw} = Nivel global de presión de ruido de impacto normalizado medido en laboratorios en dB. Cuanto menor sea este valor mejor aislamiento obtendremos
- $L'_{nT,w}$ = Nivel global de presión de ruido de impacto normalizado medido in situ en dB. El aislamiento será mejor cuanto menor sea este valor.

2.5.1.4. Transmisiones laterales.

La transmisión hacia el interior del sonido que procede del exterior es un problema acústico que se presenta de forma común en todo el recinto y las pérdidas por transmisión son las que van a determinar el aislamiento acústico que proporciona la partición (ver fig. 2.12). Las mediciones del aislamiento acústico de un cerramiento TL (Transmission Loss) o el parámetro R_A se realizan mediante ensayos en laboratorio en cámaras construidas de forma que se eliminan las transmisiones indirectas y el sonido entre salas sólo se propaga a través de la pared divisoria que se ensaya.

Se debe establecer un nivel de presión sonora L_2 en dB producida en el espacio receptor y determinar las unidades de absorción A en m^2 que tiene dicho local receptor para determinar el aislamiento acústico de un paramento divisor de la siguiente forma:

$$L_N = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{10}{A}$$

La diferencia de niveles de presión sonora $L_1 - L_2$ se denomina aislamiento bruto entre locales y se designa NR o D en España.

El problema radica en que en la realidad las paredes divisorias entre locales se encuentran conectadas a los cerramientos adyacentes y la presión sonora afecta no sólo a la pared divisoria sino a todas las superficies del local probando numerosos caminos de conexión acústica, incrementando el nivel de presión sonora en el local receptor que pasaría a tener un valor L_2 mayor que el medido en laboratorio donde no se miden las transmisiones laterales. Resulta evidente que el aislamiento bruto obtenido D' es mayor que el obtenido en ensayo de laboratorio a igualdad de área S y absorción A .

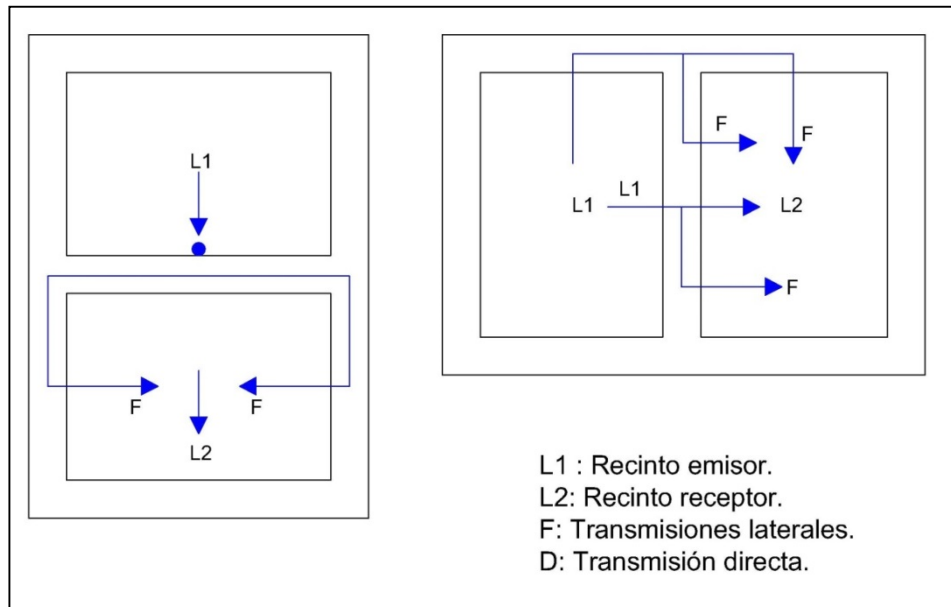


Fig. 2.12. Presencia de transmisiones laterales en ruido de impacto (izq.) y aéreo (der.)

De este modo, el tratamiento acústico de un local debe estudiarse todos los elementos que supongan un mecanismo de transmisión acústica: paramentos, suelos, techos... para obtener valores no inferiores a los esperados.

2.5.1.5. Materiales aislantes.

Los materiales cuyo uso está más extendido en edificación en lo que a cuestiones de aislamiento acústico se refiere son:

- Hormigón, terrazo, acero, suficientemente rígidos y no porosos.
- Lanás minerales. Presentan una estructura flexible de celda abierta que les proporciona una absorción acústica elevada y les confiere la propiedad de actuar como un “muelle” para amortiguar las vibraciones acústicas.
- Láminas pesadas y flexibles a base de caucho, betún o EPDM. El caucho sintético EPDM mantiene sus propiedades físicas y funcionales en rangos bajos y elevados de temperatura y aíslan frecuencias entre 2 y 3 Hz donde se encuentran los sonidos más frecuentes que afectan al confort acústico en edificación.

2.5.2. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

Se denomina absorción acústica al fenómeno producido cuando una onda sonora incide sobre una superficie donde una parte de la misma es reflejada en función de las características propias del material superficial. Es decir, la absorción acústica es la relación entre la energía no reflejada y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{incidente}} - E_{\text{reflejada}}}{E_{\text{incidente}}}$$

La presencia de una correcta absorción acústica en un recinto permite amortiguar las ondas reflejadas de forma que el recinto es más confortable acústicamente (ver fig. 2.13).

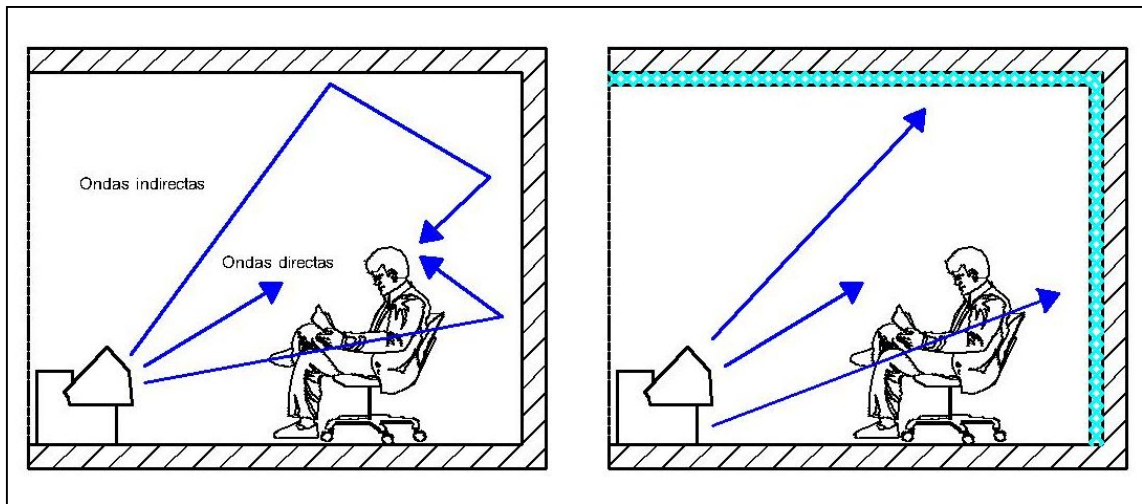


Fig. 2.13. Efecto de la absorción acústica.

2.5.2.1. Reverberación.

La reverberación es un fenómeno acústico de reflexión que se produce en un recinto cuando un frente de onda incide contra los paramentos horizontales o verticales del mismo. El conjunto de dichas reflexiones conforman lo que se denomina campo reverberante.

El grado de reverberación se cuantifica mediante el parámetro Tiempo de Reverberación (T) que se define como el período de tiempo (en segundos) que tiene que transcurrir desde que se desactiva la fuente excitadora del campo directo hasta que el nivel de presión sonora utilizada desciende 60 dB respecto de su valor inicial. La expresión más adecuada es la fórmula de Sabine.

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

Siendo:

V: Volumen del recinto en m³.

A : Absorción total del recinto.

La absorción de un material cualquiera es el resultado de multiplicar el coeficiente de absorción α por su superficie S. La unidad de absorción es el sabin, que corresponde a la absorción de 1 m² de ventana abierta, Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total A_T como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n$$

De la ecuación se desprende la dependencia de la geometría del local y de la absorción acústica interior (cerramientos, mobiliario, ocupación...) con el Tiempo de Reverberación.

2.5.2.2. Materiales absorbentes.

- Materiales resonantes: presentan su máxima absorción a una determinada frecuencia (frecuencia propia del material). Se suelen emplear en forma de placas o láminas y se utilizan cuando se dispone de espacio reducido y las condiciones obliguen a un tratamiento especial a bajas frecuencias. El coeficiente de absorción de estos materiales depende de las pérdidas internas del material de la placa y de las pérdidas por rozamiento en las sujeciones. Puede aumentarse la absorción acústica rellenando la cavidad de aire con materiales absorbentes.
- Materiales porosos: presentan un mayor coeficiente de absorción conforme aumenta la frecuencia, absorbiendo mejor los sonidos agudos que los graves. Se presentan conformados por una serie de cavidades de aire unidas entre sí. Las lanas de roca y lanas de vidrio son ejemplo de estos materiales que se suelen utilizar en combinación con materiales rígidos.
- Absorbentes en forma de membrana o panel: convierten la energía sonora en mecánica al deformarse ondulatoriamente al ser excitados por el sonido. Las absorciones máximas son para bajas frecuencias.
- Resonadores de agujero de Helmholt: Se presentan en forma de placas perforadas en su superficie. Los resonadores presentan elevados valores de absorción acústica en un estrecho rango de frecuencias.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2.

PUBLICACIONES IMPRESAS.

ARAU-PUCHADES, Higinio. *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: Ediciones CEAC, 1999. ISBN: 84-329-2017-7.

CARRIÓN ISBERT, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1º Edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Francisco Javier; DE LA PUENTE CRESPO, Javier; DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *Guía acústica de la construcción*. 2º Edición. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000. ISBN: 978-84-96437-81-4.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

LÓPEZ CEBRIÁN, Íñigo. *Acústica para la arquitectura* [en línea]. Disponible en Internet:

<http://www.acusticarq.com/upload/contents/ACUSTICA_PARA_LA_EDIFICACION%20C3%93N> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

LÓPEZ PLANTE, Silvina. Curso de acústica arquitectónica [en línea]. *Isover*. Disponible en Internet:

<http://www.isover.com.ar/descargas/acustica_arquitectonica.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MACHO STADLER, Erica. *Acústica arquitectónica* [en línea]. Universidad del País Vasco. Disponible en Internet:

<http://divulgamat2.ehu.es/divulgamat15/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=487&Itemid=75> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SOLÉ, Josep, Fundamentos de acústica [en línea]. *Ursa Uralita*. Disponible en Internet:

<http://www.telefonica.net/web2/josepsolebonet/index_archivos/fitxers/FUNDAMENTOS%20DE%20ACUSTICA.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

NORMATIVA.

UNE-EN ISO 266. Acústica. Frecuencias preferentes. AENOR. 1998.

UNE 21302-801. Vocabulario electrotécnico. Capítulo 801: Acústica y electroacústica. AENOR. 2001.

UNE-EN ISO 354. Acústica Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. AENOR. 2004.

CAPÍTULO

3

IMPORTANCIA ACTUAL DEL CONFORT ACÚSTICO Y DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO. NORMATIVA.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 3.1. CONFORT ACÚSTICO Y PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO.**
 - 3.1.1. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD.
 - 3.1.2. CONTROL DE LOS FACTORES DE RIESGO IMPLICADOS EN LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA.
- 3.2. NORMATIVA ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN.**
 - 3.2.1. DESARROLLO HISTÓRICO DEL MARCO LEGAL.
 - 3.2.2. ENTORNO LEGISLATIVO ACTUAL.

CAPÍTULO 3. IMPORTANCIA ACTUAL DEL CONFORT ACÚSTICO Y DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO. NORMATIVA.

3.1. CONFORT ACÚSTICO Y PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO.

En el capítulo 2 se definió ruido como “cualquier sonido no deseado”. De esta definición se desprende el carácter físico y objetivo del mismo (sonido) y también la consideración como fenómeno subjetivo que genera sensaciones de rechazo en un oyente.

El problema del ruido es algo que viene de muy antiguo aunque es obvio que las sociedades preindustriales se desarrollaron en un medio sonoro prácticamente natural y los efectos negativos para la salud y el medio ambiente eran nulos ya que los sonidos desagradables estaban concentrados temporal y espacialmente. A lo largo del último siglo y de manera especial en las últimas décadas, el ruido presentó un crecimiento exponencial manifestándose de forma casi permanente tanto en el tiempo como en el espacio. El desarrollo de nuevos medios de transporte, el crecimiento de las ciudades, las actividades industriales, las obras públicas, la construcción o las actividades lúdicas y recreativas entre otras causas, integran lo que se conoce como **contaminación acústica**, es decir, aquella causada por el ruido producido por actividades humanas que altera las condiciones normales del medio ambiente en un determinado lugar.

Si bien es cierto que el ruido se aceptaba como un fenómeno natural e iba ligado al desarrollo tecnológico y social de los núcleos de población, hoy en día ha dejado de serlo, convirtiéndose en indeseado en las sociedades modernas donde el **confort acústico**, entendiéndose como tal la situación en la que el nivel de ruido provocado por las actividades humanas permite un adecuado descanso, comunicación y salud de las personas, se considera un factor importante en la calidad de vida de sus habitantes.

A lo largo de los años 90, la Organización Mundial de la Salud (OMS) elaboró varias publicaciones en las que analizaba los efectos del ruido sobre la salud y establecía una serie de parámetros y recomendaciones para una correcta gestión del ruido. Estas publicaciones supusieron el comienzo al estudio relacionado con el ruido ambiental, hasta el momento sólo presente en campos como el transporte aéreo. La evaluación del impacto ambiental de las industrias e infraestructuras de transporte comenzaron a incorporar factores relacionados con el ruido y su gestión

La OMS (Organización Mundial de la Salud) sitúa el valor de 50 dB como límite superior deseable de exposición al ruido estableciendo unos valores guía para el ruido según la tabla publicada en el año 2000 (ver tabla 3.1). En el año 2005, la Unión Europea publica unos datos que desvelan que 170 millones de personas estaban diariamente expuestos a niveles de ruido ambiental entre 55-65 dB.

Tabla 3.1. Valores guía para el ruido comunitario en ambientes específicos (OMS) 2000

Ambiente específico	Efectos críticos sobre la salud	L _{Aeq} (dBA)	Tiempo (h)	L _{max fast} (dB)
Exteriores	Molestia grave en el día y al anochecer.	55	16	
	Molestia moderada en el día y al anochecer.	50	16	
Interior de la vivienda, dormitorios	Interferencia en la comunicación oral y molestia moderada en el día y al anochecer	35	16	-
	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	45
Fuera de los dormitorios	Trastorno del sueño, ventana abierta (valores en exteriores)	45	8	60
Salas de clase e interior de centros preescolares	Interferencia en la comunicación oral, disturbio en el análisis de información y comunicación del mensaje	35	Durante clases	-
Dormitorios de centros preescolares, interiores.	Trastorno del sueño	30	Durante el descanso	45
Escuelas, áreas exteriores de juegos.	Molestia (fuente externa)	55	Durante el juego	-
Hospitales, pabellones, interiores.	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	40
	Trastorno del sueño durante el día y al anochecer	30	16	-
Hospitales, salas de tratamiento, interiores.	Interferencia en el descanso y la recuperación	(1)		
Áreas industriales, comerciales y de tránsito, interiores y exteriores.	Deficiencia auditiva	70	24	110
Ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento.	Deficiencia auditiva (patrones: < 5 veces/año)	100	4	110
Discursos públicos, interiores y exteriores.	Deficiencia auditiva	85	1	110
Música y otros sonidos a través de audífonos o parlantes.	Deficiencia auditiva (valor de campo libre)	85 (4)	1	110
Sonidos de impulso de juguetes, fuegos artificiales o armas.	Deficiencia auditiva (adultos)	-	-	140 (2)
	Deficiencia auditiva (niños)	-	-	120 (2)
Exteriores de parques de diversión o áreas de conservación.	Interrupción de la tranquilidad	(3)		

(1): Lo más bajo posible.
 (2): Presión sonora máxima (no L_{AF}, máx) medida a 100 mm del oído.
 (3): Se debe preservar la tranquilidad de los parques y áreas de conservación y se debe mantener baja la relación entre el ruido intruso y el sonido natural de fondo.
 (4): Con audífonos, adaptado a valores de campo libre.

3.1.1. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD.

El estado actual del conocimiento permite evidenciar ciertos efectos no deseados en el organismo cuando se le somete a determinados niveles sonoros.

Efectos fisiológicos auditivos.

La exposición continuada a niveles de ruido superiores a 85 dBA puede provocar la pérdida paulatina de audición, como ocurre con los trabajadores expuestos a estos niveles a lo largo de la jornada laboral y durante largos períodos de tiempo. El desplazamiento del umbral auditivo puede ser temporal, recuperándose cuando desaparece la exposición a niveles elevados de ruido pero puede llegar a tener carácter permanente si no se interrumpe la exposición. En cuanto a la exposición puntual a niveles elevados de ruido, cuando son superiores a 120 dBA, producen un dolor intenso, inflamación del oído interno y otros efectos dañinos sobre el órgano del oído. A partir de 135 dBA es probable que se produzca la ruptura del tímpano.

Además de la pérdida auditiva, la exposición al ruido puede derivar en otros efectos relacionados con la capacidad auditiva como el efecto máscara, que se produce cuando un sonido impide la percepción total o parcial de otros sonidos.

Efectos fisiológicos no auditivos.

Existen datos científicos suficientes para considerar al ruido como un agente desencadenante de una serie de reacciones que se manifiestan a nivel fisiológico en el organismo en enfermedades cardiovasculares, alteraciones del aparato digestivo, cambios hormonales y reducción del sistema inmunitario de defensa.

Alteración del sueño.

El ruido influye negativamente sobre el sueño de tres formas diferentes, que se dan de forma general, a partir de los 30 dB.

- Dificultad o imposibilidad de conciliar el sueño.
- Interrupción del sueño. A partir de 45 dBA la posibilidad de despertar es muy grande.
- Disminución de la calidad del sueño. Si la situación es prolongada, el equilibrio físico y psicológico se ve claramente afectado.

Efectos psicosociales.

Molestia. Constituye el efecto más común sobre las personas. La sensación de malestar procede de la interferencia con la actividad que se está realizando, con el reposo y con una serie de sensaciones como intranquilidad, inquietud, ansiedad o rabia. Durante el día se experimenta malestar moderado a partir de los 55 dB, disminuyendo estas cifras entre 5 y 10 dB en período nocturno.

Inteligibilidad de la palabra. El nivel de voz del ser humano se sitúa en un intervalo comprendido entre los 40 y los 65 dBA. Se establece de forma

empírica que un ruido ambiental que supere en 10 dBA al nivel de voz produce un enmascaramiento que interfiere con la inteligibilidad de la conversación.

Pérdida de atención y concentración. La realización de cualquier actividad necesita de la utilización de señales acústicas y tanto el ruido de fondo como un ruido repentino provocarán una intercepción con estas señales que reducirán el rendimiento del trabajo.

El estrés y sus manifestaciones. Las personas sometidas a las situaciones anteriormente descritas (ruidos que perturben sus esfuerzos de atención o comunicación y que hayan afectado a su descanso) pueden desarrollar alguno de los síndromes siguientes:

- Cansancio crónico.
- Tendencia al insomnio.
- Trastorno psicofísicos: ansiedad, depresión, náuseas, jaquecas y neurosis.
- Cambios conductuales, como hostilidad, intolerancia, aislamiento social o agresividad.

3.1.2. CONTROL DE LOS FACTORES DE RIESGO IMPLICADOS EN LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA.

Tradicionalmente, la gestión del ruido se realizaba por el control de las actividades en el suelo urbano residencial, ya que estas actividades conllevaban la mayoría de las quejas ciudadanas relacionadas con el ruido. No obstante, a medida que la sensibilidad ciudadana frente a esta forma de contaminación se incrementa, la presencia de fuentes de ruido se generaliza y aparecen nuevas exigencias a las que es necesario responder.

El establecimiento de controles adecuados con respecto a los siguientes factores supone una disminución de la contaminación acústica y unos niveles aceptables de confort acústico:

- Control de los niveles sonoros ambientales.
- Control de las características acústicas de las edificaciones.
- Control de los emisores acústicos innecesariamente ruidosos.
- Control de las condiciones acústicas en locales de pública concurrencia.

La publicación y entrada en vigor de numerosa normativa en relación con la protección contra el ruido durante la primera década de los años 2000 establece un marco global de referencia en la regulación de la contaminación acústica hasta el momento insuficiente, disperso y a menudo desdoblado, cubriendo los aspectos que implican los factores mencionados anteriormente.

La gestión del ruido pasa de ser un aspecto parcial a formar parte de la planificación estratégica de la ciudad como consecuencia, en parte, del proceso edificatorio.

3.2. NORMATIVA ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN.

3.2.1. DESARROLLO HISTÓRICO DEL MARCO LEGAL.

Generalizando para toda actividad de edificación, donde se integran las condiciones acústicas, el punto de partida lo constituye la creación en 1937 de la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación. Esta institución desarrolló a partir de 1957 las denominadas Normas MV, normas técnicas que regulaban el sector de la edificación.

En 1977 el Gobierno crea un marco unificado para toda la normativa relacionada con la edificación compuesto por:

- Normas Básicas de la Edificación (NBE), cuya aplicación era de obligado cumplimiento para los agentes del sector.
- Normas Tecnológicas de Edificación (NTE). No tenían carácter obligatorio y servían como desarrollo operativo de las NBE.
- Soluciones Homologadas de la Edificación (SHE). Se crearon para complementar las soluciones constructivas convencionales o tradicionales a los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT), evaluaciones técnicas favorables para las soluciones innovadoras otorgadas por el instituto Eduardo Torroja. Finalmente no se desarrollaron.

En 1999 se publica la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) que responde a la necesidad de actualización normativa en materia de la edificación y regula dicho sector autorizando al gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación que establezca las condiciones que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad

Aunque su ámbito no se reduzca exclusivamente a la edificación, por lo que implica en este sector, es necesario incluir la Ley 37/2003 del Ruido en la trayectoria normativa en el campo de la Acústica en la edificación.

En 2006 se aprueba el RD 314/2006 por el cual entra en vigor el Código Técnico de la Edificación y se derogan las hasta entonces vigentes NBE. Se estableció un plazo de 6 a 12 meses en el cual ambas normativas podían coexistir. El Documento Básico de Protección frente al Ruido DB-HR fue aprobado posteriormente en el RD 1271/2007. La evolución normativa en el sector de la edificación en España se puede ver de forma esquemática en la fig. 3.1.

1937	Creación de la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación.
1957	Normas MV del Ministerio de Vivienda.
1977	Marco legislativo unificado compuesto por: NBE NTE SHE DIT
2000	LOE
2003	Ley del Ruido.
2007	CTE

Fig. 3.1 Cuadro resumen cronológico de la normativa en el sector de la edificación en España.

3.2.1.1. NBE-CA 88.

En 1981 se publica el RD 1909/1981, de 24 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CA 81 sobre condiciones acústicas en los edificios. Se introdujeron modificaciones en los años 1982 y 1988 pasando a ser conocida como NBE-CA 88.

Su elaboración responde, como se indica en el Boletín Oficial (BOE 7 de septiembre 1981) donde fue publicada, a: *“la necesidad de proteger a los ocupantes de los edificios de las molestias físicas y psíquicas que ocasionan los ruidos aconseja dictar una norma que establezca las condiciones mínimas exigibles para mantener en ellos un nivel acústico aceptable”*

La NBE-CA 88 caracteriza acústicamente los elementos verticales y horizontales que conforman los espacios habitables interiores. Para las instalaciones consideraba los niveles de ruido y vibraciones que producían en los recintos del edificio que se encontraban bajo su influencia y daba una serie de recomendaciones para el acondicionamiento acústico de los locales.

La caracterización acústica de los elementos se determinaba con el índice R_A : índice global de reducción acústica ponderado A, que se mide en laboratorio y propone fórmulas para calcularlo en el caso de no tenerlo.

La norma propone valores mínimos exigibles de aislamiento acústico de los diferentes elementos constructivos clasificándolos en particiones verticales, particiones horizontales, fachadas y cubiertas expresando su valor con las siguientes magnitudes:

- R_A : Para ruido aéreo.
- L_N : Nivel de ruido de impactos normalizado ponderado A

- a_G : Aislamiento global para ruido aéreo. Se define como el índice de reducción acústica ponderado A del conjunto formado por la ventana y la parte ciega.

La forma de expresar los valores límite de aislamiento no resultaba adecuada al utilizar valores que se determinaban en laboratorio y que no eran verificables “in situ”. Esta y otras deficiencias que tenía la NBE-CA 88 y que se subsanaron posteriormente con la aprobación del CTE se especifican en el apartado 3.2.2.3 de este capítulo.

La NBE CA-88 incluía también en su anexo 5 los valores máximos recomendados de inmisión a ruido aéreo (ver tabla 3.2) según los locales de los diferentes tipos de edificios que más tarde tendrían su correspondencia en la Ley 37/2003 del ruido.

Tabla 3.2. Niveles máximos de inmisión recomendados para los locales. Tabla 5.1 Anexo 5, NBE CA-88.

Tipo de edificio	Local	Nivel L_{eq} máximo de inmisión recomendado (dBA)	
		Durante el día (8-22 h)	Durante la noche(22-8 h)
Residencial privado	Estancias	45	40
	Dormitorios	40	30
	Servicios	50	-
	Zonas comunes	50	-
Residencial público	Zonas de estancia	45	30
	Dormitorios	40	-
	Servicios	50	-
	Zonas comunes	50	-
Administrativo y de oficinas	Despachos profesionales	40	-
	Oficinas	45	-
	Zonas comunes	50	-
Sanitario	Zonas de estancia	45	-
	Dormitorios	30	25
	Zonas comunes	50	-
Docente	Aulas	40	-
	Sala lectura	35	-
	Zonas comunes	50	-

3.2.2. ENTORNO LEGISLATIVO ACTUAL.

Particularizando ya en lo relativo a la protección contra el ruido en la edificación, el marco reglamentario nacional se organiza en dos vertientes: una ambiental que se rige por la Ley del Ruido y otra edificatoria marcada por la LOE y el CTE.

3.2.2.1. De la Directiva Europea 2002/49/CE a La Ley 37/2003 de Ruido.

La Directiva marco 2002/49/CE relativa a la evaluación del ruido ambiental es el primer intento de abordar de manera global el intento de contaminación acústica. Establece una cartografía del ruido para todas las grandes aglomeraciones urbanas de la Unión Europea mediante indicadores comunes para medir la contaminación acústica durante el día y la noche y establece las medidas comunitarias de reducción del ruido emitido por las principales fuentes

de emisión de ruido. Hasta su publicación, las directivas europeas limitaban los niveles de sonoridad de equipos de construcción, vehículos a motor, aparatos domésticos...

La Ley 37/2003 de Ruido se publicó con el objetivo inicial de trasponer la Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, pero además desarrolla otros aspectos adicionales orientados a la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación acústica producida por cualquier emisor acústico.

La Ley del Ruido se desarrolla mediante dos Reales Decretos:

- RD 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión de ruido ambiental. Este Real Decreto da respuesta a la necesidad de la transposición de la Directiva Europea especificando metodología y contenido de los mapas estratégicos de ruido y planes de acción para su remisión a la Comisión Europea.
- RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Concreta los valores de referencia para el desarrollo del Plan de Acción así como la relación entre contaminación acústica y ordenación de territorio.

Ley 37/2003 del Ruido.

La publicación de la Ley 37/2003 del Ruido supone la presencia por primera vez en España de una norma general reguladora del ruido, que con anterioridad se recogía en normativa sobre limitación de ruido en el ambiente de trabajo, disposiciones técnicas para la homologación de productos, ordenanzas municipales y normativa civil en cuando a relaciones de vecindad y causación de perjuicios.

En el ámbito de aplicación, la Ley define contaminación acústica en el Artículo 3. Definiciones como: *“presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine”*. En el mismo artículo se define emisor acústico como: *“cualquier actividad, infraestructura, equipo, maquinaria o comportamiento que genere contaminación acústica”*. Quedan fuera de la consideración de emisor acústico las actividades domésticas, ruido producido por los vecinos, actividades laborales y militares y el ruido producido en el interior de los medios de transporte.

La contaminación acústica de un lugar por un periodo de tiempo se cuantifica mediante índices acústicos, magnitudes físicas que, a efectos de esta Ley, se corresponden a las 24 horas del día, al período diurno, vespertino y diurno.

La Ley del Ruido establece la competencia de las diferentes Administraciones Públicas para la aprobación, elaboración y revisión de mapas de ruido de

grandes ejes viarios y ferroviarios, grandes aeropuertos y aglomeraciones urbanas, además de instar a las Administraciones a la elaboración y ejecución de planes de acción destinados a la reducción de contaminación acústica.

RD 1513/2005.

Esta normativa desarrolla principalmente dos aspectos:

- Metodología para la evaluación acústica (Mapas Estratégicos de Ruido y Planes de Acción) y contenido de los resultados para su remisión a la Comisión Europea.
- Calendario de entrega de la documentación sobre los Mapas Estratégicos de Ruido y los Planes de Acción por parte de las aglomeraciones y de los gestores de los focos.

RD 1367/2007.

El Real Decreto desarrolla los siguientes aspectos:

- Zonificación acústica: Tiene por objeto el establecimiento de una relación entre los usos del suelo y la sensibilidad al ruido asociada. Como consecuencia de la zonificación acústica se definen los objetivos de calidad acústica a cumplir en el municipio.
- Objetivos de calidad acústica: Niveles de ruido que se deben cumplir en cada zona del municipio en función de la zonificación realizada.
- Los límites de las emisiones acústicas.
- Define la metodología de evaluación de los niveles sonoros y los criterios en base a los cuales se identifican los impactos generados por la contaminación acústica.

Mapas de ruido.

Como vemos, el desarrollo reglamentario de la Ley 37/2003 a través de los dos Reales Decretos complementan el marco normativo general para el desarrollo de los instrumentos de gestión de la contaminación acústica mediante dos herramientas fundamentales: los mapas de ruido y los planes de acción.

Al tener el ruido un carácter local, hace necesaria una zonificación según áreas acústicas con unos objetivos de calidad acústica diferentes para cada una de ellas. Por lo tanto, los mapas estratégicos de ruido son instrumentos confeccionados para realizar una adecuada y global evaluación de la exposición al ruido en una zona determinada y persiguen los siguientes objetivos:

- Evaluación global de la exposición a la contaminación acústica en una determinada zona.
- Realizar predicciones globales para cada zona.
- Facilitar la ejecución de planes de acción así como medidas correctoras para reducir la contaminación acústica y cumplir con los objetivos marcados.

Para ello, los mapas de ruido para cada área acústica deben incluir la siguiente información:

- Número estimado de viviendas, colegios y hospitales expuestos.
- Valores de los índices acústicos existentes o previstos.
- Valores límite en términos de inmisión
- Objetivos de calidad acústica.
- Evaluación del cumplimiento según los valores existentes frente a los valores límite aplicables y objetivos previstos.

Además, la confección de los mapas de ruido deberán constar de:

- Mapas de niveles sonoros según los índices acústicos L_{den} , L_{noche} , $L_{día}$, L_{tarde} con la representación gráfica de las curvas isófonas y áreas ocupadas por rangos acústicos coloreadas a partir de 55-60 dBA hasta los superiores a 75 dBA en mapas diurnos y a partir de 50 dBA en los nocturnos.
- Mapas de exposición, que muestran los valores de exposición en fachadas de viviendas y el número de personas afectadas.
- Mapas de zonas de afección, representando el área afectada por niveles acústicos superiores a 55 dBA.

Los mapas de ruido habrán de revisarse y modificarse si es necesario cada 5 años a partir de su fecha de aprobación. El R.D 1513/2005 establece en su disposición adicional la creación del S.I.C.A (Sistema Básico de Información sobre la Contaminación Acústica), dependiente del Ministerio del Medio Ambiente. El S.I.C.A constituye una gran base de datos para la organización de información relativa a la contaminación acústica y permite la libre consulta de mapas estratégicos del ruido y planes de acción que se están desarrollando por parte de las distintas administraciones.

Por último, en la actualidad, la Comisión Europea está desarrollando el método CNOSSOS-EU para mejorar la fiabilidad, consistencia y comparabilidad de los resultados a lo largo de los diferentes estados miembros de la Unión Europea,

en el marco de una estrategia global para la reducción de los niveles sonoros en Europa.

3.2.2.2. La Ley del Ruido y la edificación.

Los edificios se ven claramente afectados por la Ley del Ruido que los considera receptores acústicos, por lo que sea cual sea el uso del edificio (residencial, tanto público como privado, hospitalario, docente o cultural), deben cumplirse los requisitos de calidad acústica en su interior.

En el ámbito del planeamiento urbanístico, la Ley del Ruido establece que las Administraciones Públicas zonifiquen el suelo en áreas acústicas, las cuales son sectores del territorio donde se deben cumplir unos determinados objetivos de calidad acústica ambiental. Estas áreas tienen asignados unos valores máximos de inmisión de ruido ambiental y se clasifican en función del uso predominante del suelo.

Relación entre la Ley del Ruido y el DB-HR.

En lo relativo a protección de los usuarios con respecto al ruido procedente del exterior y de las instalaciones, la redacción del DB-HR se coordinó con la Ley 37/2003 del ruido y sus desarrollos reglamentarios (ver fig. 3.2).

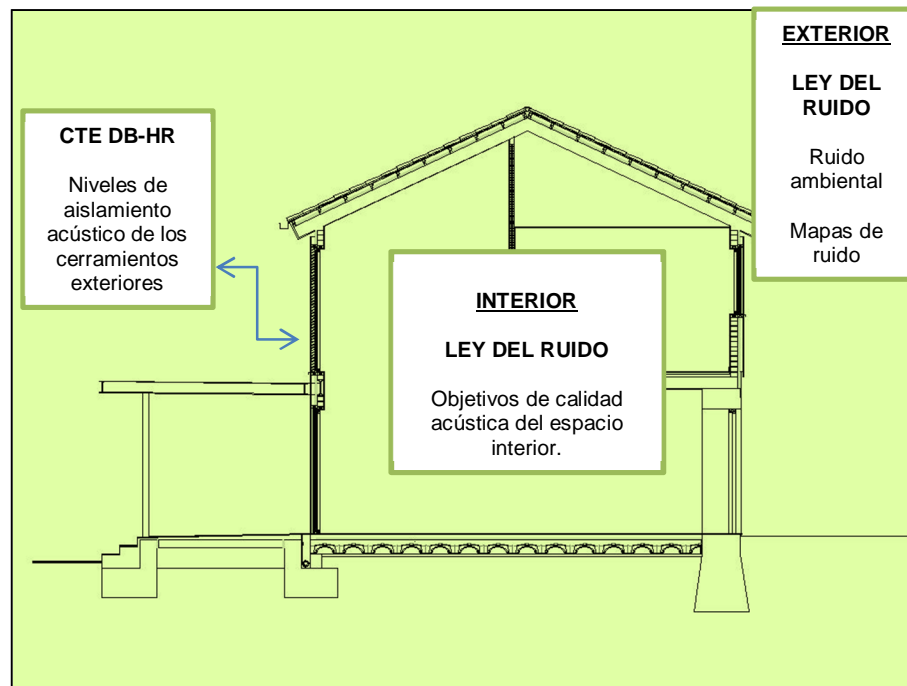


Fig. 3.2. Relación entre la Ley del Ruido y el DB-HR.

Respecto a la protección de los usuarios frente al ruido el DB-HR fija en la tabla 2.1 los niveles de aislamiento acústico exigidos a los cerramientos que limitan con el exterior: fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior.

Para el establecimiento de estos niveles se consideró que el aislamiento acústico que debe proporcionar un cerramiento es la diferencia entre el nivel de inmisión exterior existente o previsto en la zona donde se emplaza el edificio y el nivel de inmisión interior requerido para que los usuarios puedan realizar sus actividades con comodidad en los recintos interiores. Para ello se han tenido en cuenta fundamentalmente tres aspectos:

- Los valores límite de los índices de ruido ambiental para los sectores del territorio fijados por el RD 1367/2007.
- Los valores límite de inmisión en el interior de los edificios establecidos por el RD 1367/2007.
- El conocimiento de los niveles de ruido de determinadas zonas, ya que los mapas de ruido están a disposición del público.

Es de gran importancia resaltar que el DB-HR fija los niveles de aislamiento acústico de los cerramientos exteriores, no fija niveles de inmisión en el espacio interior del edificio por lo que los valores de la tabla 2.1. En el caso de verificación in situ de los valores de la tabla 2.1 se debe comprobar el nivel real de aislamiento de la solución adoptada y no el nivel de inmisión interior que dependerá del nivel de inmisión exterior que exista en el momento de la medición y que puede ser diferente al L_D (Índice de ruido día en dBA obtenido en mapas estratégicos de ruido) adoptado en el dimensionamiento de la solución.

En cuanto a la inmisión por el ruido de las instalaciones de los edificios el DB-HR tiene dos enfoques:

- En lo relativo al diseño: limitar la potencia acústica de los equipos de las instalaciones.
- En lo relativo a cuestiones constructivas: establecer condiciones constructivas que limiten la transmisión de ruido y vibraciones a través de puntos singulares como sujeciones o contactos entre instalaciones y elementos constructivos.

3.2.2.3. De la LOE al CTE.

En el año 1999 se aprobó la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE) con los siguientes objetivos:

- Regular el proceso de la edificación.
- Fijar responsabilidades y funciones de los agentes intervinientes en el proceso.
- Establecer un sistema de garantías para los usuarios.

La LOE establece en el Capítulo II, artículo 3 “Requisitos básicos de la edificación” los requisitos básicos que deben cumplirse para garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente, agrupándolos en tres familias:

- Los relativos a la funcionalidad: utilización, accesibilidad, acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información y facilitación para el acceso de servicios postales.
- Los relativos a la seguridad: estructural, en caso de incendio y de utilización.
- Los relativos a la habitabilidad: higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico y otros aspectos funcionales.

El requisito básico de protección contra el ruido debe garantizar que *“el ruido percibido no ponga en peligro la salud de las personas y les permita realizar satisfactoriamente sus actividades”*.

De la LOE se deriva al Código Técnico de la Edificación (CTE) donde se establecen las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones para cumplir los requisitos básicos establecidos en la LOE (ver fig. 3.3).

- Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.
- R.D. 314/2006 que aprueba el Código Técnico de la Edificación, CTE
- **R.D. 1371/2007 que aprueba el DB-HR Protección frente al Ruido**
 - R.D. 1675/2008, de 17 de octubre, que modifica el R.D. 1371/2007 (6 meses más de moratoria)
 - Orden VIV/984/2009 de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del CTE aprobados por el RD 314/2006 y RD 1371/2007
 - Corrección de errores y erratas de la Orden VIV/984/2009, de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación, aprobados por el R.D 314/2006, de 17 de marzo, y el R.D 1371/2007

Fig. 3.3. De la LOE al CTE.

La estructura del CTE se divide en dos partes, ambas de carácter reglamentario:

- Parte I: Contiene las disposiciones, condiciones generales de aplicación y las exigencias básicas que deben cumplir los edificios en las fases de proyecto, construcción, mantenimiento y conservación de los edificios y sus instalaciones.

- La segunda parte: formada por los Documentos Básicos que contienen la caracterización y cuantificación de las exigencias básicas y los procedimientos válidos para acreditar su cumplimiento.

El Documento Básico DB-HR Protección contra el Ruido.

En lo referente a la protección contra el ruido el CTE en su parte I, artículo 14 establece su objetivo: *“limitar dentro de los edificios, y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento”*.

El mismo artículo también incluye cómo satisfacer este objetivo: *“Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán, utilizarán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos”*.

Para ello, los parámetros y sistemas de verificación que especifica el “Documento Básico DB HR Protección contra el ruido” aseguran la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección contra el ruido.

Objetivos del DB-HR.

La elaboración del DB-HR persigue tres objetivos principales:

- Elevar los niveles de aislamiento acústico en la edificación adecuándolos a la media europea.
- Tener en cuenta todos los mecanismos de transmisión acústica entre recintos, incluida la transmisión de ruido por flancos, no contemplada por la NBE-CA 88.
- Limitar el ruido reverberante en estancias donde se necesitan altos niveles de inteligibilidad o bajos ruidos de fondo como restaurantes o salas de conferencias.

Diferencias entre NBE-CA 88 y DB-HR

El Documento Básico DB-HR introduce las siguientes novedades respecto a la anterior normativa en materia de acústica (NBE-CA-88):

Carácter prestacional de la norma: El carácter prestacional del DB-HR supone el principal avance con respecto a la normativa anterior de condiciones acústicas, ya que las exigencias que se deben cumplir en términos de eficacia

son del edificio ya construido no sólo en fase de proyecto como ocurría con la NBE CA-88.

Terminología: Se introducen nuevos términos que definen y diferencian los recintos en las edificaciones estableciendo distinciones entre recintos habitables, protegidos, de actividad e instalaciones.

Exigencia de acondicionamiento acústico: La redacción de la normativa anterior realizaba unas recomendaciones respecto al acondicionamiento acústico de locales. El DB-HR introduce la necesidad de adecuar los tiempos de reverberación de ciertos locales como restaurantes, comedores, aulas y salas de conferencias (de volumen inferior a 350 m³ para lo que establece unos valores máximos verificables en obra respecto de los tiempos de reverberación.

Nuevos parámetros de aislamiento: Los parámetros de aislamiento que introduce el DB-HR y mediante los que se expresan las exigencias de aislamiento acústico entre recinto y respecto al exterior tienen en cuenta las transmisiones indirectas o estructurales, no consideradas en laboratorio. Estos valores pueden obtenerse in situ y provocan que se pase a considerar el aislamiento entre recintos en lugar de aislamiento de particiones como hacía la anterior normativa. La tabla 3.3 ilustra esta comparativa.

Tabla 3.3. Comparativa de los índices de aislamiento del DB-HR con los de la NBE-CA-88

Índices de aislamiento	DB-HR	NBE-CA-88
	Valor obtenido in situ	Valor obtenido en laboratorio
Ruido aéreo	$D_{nT,A}$	R_A
Ruido de impactos	$L'_{nT,w}$	L_N
Ruido procedente del exterior	$D_{2m,nT,Atr}/D_{2m,nT,A}$	a_g

Cambio en la exigencia de aislamientos mínimos: Se produce un incremento en los valores de aislamiento acústico mínimo exigido tanto a ruido aéreo como de impacto. En la tabla 3.4 se muestran dichos cambios.

Tabla 3.4. Comparativa de los niveles de exigencia de aislamiento del DB-HR con los de la NBE-CA-88

Aislamiento acústico a ruido aéreo	Aislamiento exigido por el DB-HR	Aislamiento exigido por la NBE-CA-88
Entre unidades de uso distintas, colindantes vertical y horizontalmente.	$D_{nT,A} \geq 50 \text{ dBA}$	$R_A \geq 45 \text{ dBA}$
En una misma unidad de uso	$R_A \geq 33 \text{ dBA}$	$R_A \geq 30 \text{ dBA}$ o $R_A \geq 35 \text{ dBA}$
Entre una unidad de uso y un recinto de instalaciones o de actividad, colindantes vertical u horizontalmente	$D_{nT,A} \geq 55 \text{ dBA}$	$D_{nT,A} \geq 55 \text{ dBA}$ (respecto a recinto de instalaciones) $D_{nT,A} \geq 45 \text{ dBA}$ (respecto a recinto de actividad)
Entre una unidad de uso y una zona común que no compartan puertas o ventanas, colindantes vertical u horizontalmente	$D_{nT,A} \geq 50 \text{ dBA}$	$R_A \geq 45 \text{ dBA}$

(Continúa)

Aislamiento acústico a ruido aéreo		Aislamiento exigido por el DB-HR	Aislamiento exigido por la NBE-CA-88
Entre un recinto protegido y el exterior	Predominio de tráfico rodado	$D_{2m,nT,Atr} \geq 30-47$ dBA	$a_g \geq 30$ dBA (valor global) $R_A \geq 45$ dBA (parte ciega)
	Predominio de tráfico aéreo	$D_{2m,nT,Atr} \geq 34-51$ dBA	
	Predominio de tráfico ferroviario	$D_{2m,nT,Atr} \geq 30-47$ dBA	
Aislamiento acústico a ruido aéreo		Aislamiento exigido por el DB-HR	Aislamiento exigido por la NBE-CA-88
Nivel global de presión de ruido de impactos en un recinto protegido colindante vertical, horizontalmente o con una arista común con:	Cualquier otro perteneciente a una unidad de uso diferente o con una zona común	$L'_{nT,w} \leq 65$ dB	$L_N \leq 80$ dB
	Un recinto de actividad o con un recinto de instalaciones	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB	

Cambio en la verificación de los aislamientos exigidos: Los nuevos índices acústicos permiten la comprobación in situ del cumplimiento de las exigencias mientras que los parámetros de la NBE-CA-88 representaban mediciones en laboratorio.

Requisitos de diseño y ejecución: Establece requisitos de diseño y ejecución de los elementos constructivos e instalaciones con el fin de garantizar un correcto aislamiento acústico y evitar la transmisión de ruido y vibraciones. Las exigencias de aislamiento del DB-HR, además de tener en cuenta las transmisiones indirectas, implican unas condiciones de ejecución en obra que eliminen los posibles puentes acústicos que puedan disminuir el aislamiento final de la solución. Una ejecución de obra incorrecta (ausencia de sellado o rozas no macizadas) y la presencia de puentes acústicos (conducto de ventilación que conecte directamente recinto emisor y receptor de sonido) junto con las transmisiones por vía indirecta constituyen los motivos por los cuales el aislamiento acústico de un elemento constructivo in situ es inferior al valor obtenido en laboratorio

Materiales: Los fabricantes de los materiales empleados en la construcción deberán documentar una serie de características respecto de los mismos así como las propiedades acústicas de los elementos constructivos de los que forman parte.

Soluciones de aislamiento acústico para el diseño y dimensionado en fase de proyecto: Establece dos opciones:

- Opción simplificada: Proporciona las características acústicas mínimas de las soluciones constructivas que satisfacen las exigencias de aislamiento de

las diferentes situaciones, como entre unidades de uso diferentes, entre una unidad de uso y una zona común...

- Opción general: Establece un procedimiento de cálculo que permite comprobar si las soluciones constructivas que se pretenden ejecutar cumplirán con las exigencias de aislamiento establecido. El procedimiento se basa en el modelo simplificado para transmisión acústica estructural de la norma UNE EN 12354 partes 1,2 y 3.

Índices de aislamiento incluidos en el DB-HR.

Se definen a continuación las nuevas magnitudes de medida incluidas en el DB-HR y sus expresiones de cálculo.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, $D_{nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT} , para ruido rosa. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D_{nT,A} = -10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i}) / 10} \text{ (dBA)}$$

Siendo: $D_{nT,i}$: Diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i (dB).
 $L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i (dBA).
 i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para ruido rosa. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D_{2m,nT,A} = -10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{2m,nT,i}) / 10} \text{ (dBA)}$$

Siendo: $D_{2m,nT,i}$: Diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i (dB).
 $L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i (dBA).
 i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

Este índice también se utiliza para la valoración global en el caso de que el ruido exterior dominante sea el ferroviario o el de estaciones ferroviarias, pero

usando los valores del espectro normalizado de ruido ferroviario o de estaciones ferroviarias A.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para ruido exterior de automóviles. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D_{2m,nT,Atr} = -10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{2m,nT,i}) / 10} \text{ (dBA)}$$

Siendo: $D_{2m,nT,i}$: Diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i (dB).
 $L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i (dBA).
 i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

Este índice también se utiliza para la valoración global en el caso de que el ruido exterior dominante sea de aeronaves, pero usando los valores del espectro normalizado correspondiente A.

Nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado $L'_{nT,w}$. Se determina mediante el procedimiento que indica la norma UNE EN 717-2, a partir de los resultados de medición realizados en bandas de tercio de octava ajustándolo a la curva de referencia de acuerdo a la norma UNE EN ISO 140-7.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3.

PUBLICACIONES IMPRESAS.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Francisco Javier; DE LA PUENTE CRESPO, Javier; DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *Guía acústica de la construcción*. 2º Edición. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000. ISBN: 978-84-96437-81-4.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

BERGLUND, Birgitta; LINDVALL Thomas; SCHWELLA, Dietrich H. *Guía para el ruido urbano*. Traducción del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. Organización Mundial de la Salud. 1995. Disponible en Internet: <http://www.juristas-ruidos.org/Documentacion/guia_oms_ruido_1.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *La acústica en la edificación española, análisis de la situación actual* [en línea]. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en Internet: <http://www.aemcm.net/archivos/p2_1_2_acustica.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA. *La actuación contra el ruido y la mejora del ambiente sonoro de nuestros municipios* [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.bizkaia.net/home2/Archivos/DPTO9/Temas/Pdf/GUIA%20TECNICA%20RUIDO%20ACTIVIDADES%20AYUNTAMIENTOS_DFB.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GARCÍA SANZ, Benjamín; GARRIDO, Francisco Javier. *La contaminación acústica en nuestras ciudades* [en línea]. Fundación La Caixa. 2003. Disponible en Internet: <http://www.fundacio.lacaixa.es/StaticFiles/StaticFiles/48ff438045dcf010VgnVCM1000000e8cf10aRCRD/es/es12_esp.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

INSTITUTO EDUARDO TORROJA. *Guía de aplicación del DB HR Protección frente al ruido*. Versión V.01. 2009. Disponible en Internet: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentosadicionales/complementarios/texto_0011.html> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MENÉNDEZ RODRÍGUEZ, Vicente. *Instrumentación acústica* [en línea]. García BBM. 2007. Disponible en Internet: <http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48122/componente48120.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

VEGA CATALÁN, Luis. *La trayectoria normativa en acústica para la edificación* [en línea]. Instituto Valencia de la Edificación. 2010. Disponible en Internet: <http://www.five.es/cursos-jornadas/pdf/1_la%20trayectoria.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

NORMATIVA.

Norma básica de edificación NBE-CA-88 sobre las condiciones acústicas de los edificios. Ministerio de obras Públicas y Urbanismo. 1988.

Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. Jefatura del Estado. 1999.

Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2003.

RD 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2005.

RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2007.

Parte I. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. 2007.

Documento Básico HR: Protección frente al ruido. Ministerio de Fomento. 2009

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 4.1. PROCESOS CONSTRUCTIVOS DENTRO DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL DB-HR.**
 - 4.1.1. AISLAMIENTO ACÚSTICO
 - 4.1.2. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.
 - 4.1.3. RUIDO Y VIBRACIONES DE LAS INSTALACIONES.
- 4.2. REHABILITACIÓN ACÚSTICA.**
 - 4.2.1. METODOLOGÍA GENERAL.
 - 4.2.2. ORIGEN DEL RUIDO.
- 4.3. DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS SINGULARES.**
 - 4.3.1. ESPACIOS COMUNITARIOS.
 - 4.3.2. TEATROS.
 - 4.3.3. SALAS DE CONCIERTOS.

CAPÍTULO 4. INTEGRACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS. SOLUCIONES ACÚSTICAS.

Como se expuso en el apartado anterior referente a la Normativa, el Código Técnico de la Edificación desarrolla el requisito de habitabilidad de bienestar acústico contenido en la LOE mediante el documento básico de Protección contra el Ruido DB-HR. Para satisfacer los objetivos establecidos, los edificios se deberán proyectar, construir, utilizar y mantener de forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión de ruido aéreo, ruido de impacto y del ruido y vibraciones procedentes de las instalaciones del edificio así como para limitar el ruido reverberante de los recintos.

El CTE afecta a todos los agentes de la edificación, desde el promotor hasta el usuario, lo que se traduce en cambios en la redacción de proyectos, exigencias mayores en la ejecución de obra y la necesidad de adaptación a los criterios del CTE de los productos y elementos que ofrece el mercado. Todo esto provoca la necesidad de actuar a lo largo de todas las fases del proceso constructivo. De forma esquemática, la metodología de trabajo se describe a continuación diferenciando entre las tres vertientes especificadas en el DB-HR:

Aislamiento acústico.

Fase de proyecto básico:

- 1) Ámbito de aplicación de las exigencias de aislamiento acústico.
- 2) Zonificación del edificio.
- 3) Estudio de los niveles límite exigidos para ruido interior, ruido exterior y ruido procedente de otros edificios.

Fase de proyecto de ejecución:

- 1) Definición de los elementos constructivos concretos que satisfacen las exigencias de aislamiento acústico mediante las opciones propuestas por el DB-HR:
 - Opción simplificada.
 - Opción general.

Para la utilización de ambas opciones se requiere información sobre el aislamiento acústico obtenido en laboratorio de los elementos constructivos. Esta información puede obtenerse de:

- El Catálogo de Elementos Constructivos (CEC). Documento Oficial de ayuda al proyectista que contiene Es un compendio de diferentes materiales, productos y elementos constructivos caracterizados por sus prestaciones higrotérmicas y acústicas.
 - Mediciones de laboratorio aportadas por fabricantes y realizadas según los procedimientos indicados en las normativa correspondiente contenida en el Anejo C del DB-HR
 - Aplicación de métodos de cálculo sancionados por la práctica: Ley de masa, normas UNE, etc.
- 2) Definición de los encuentros entre los elementos constructivos.

En obra.

- 1) Recepción de productos.
- 2) Ejecución y control.
- 3) Control de la obra terminada.

Acondicionamiento acústico.

Fase de proyecto de ejecución:

- 1) Identificación de los recintos.
- 2) Determinación de las exigencias.
- 3) Elección de materiales y verificación de las exigencias.

Ruido y vibración de las instalaciones.

Fase de proyecto de ejecución:

- 1) Diseño y condiciones de montaje de equipos y redes de conductos de tuberías.

En obra:

- 1) Verificación de las condiciones de diseño.
- 2) Control de la ejecución.

4.1. PROCESOS CONSTRUCTIVOS DENTRO DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL DB-HR.

4.1.1. AISLAMIENTO ACÚSTICO.

4.1.1.1. Zonificación del edificio.

Los valores límite de aislamiento acústico especificados en el apartado 2.1 del DB-HR se pueden clasificar en tres grupos atendiendo a su procedencia:

- Ruido interior. Ruido aéreo y de impactos entre recintos de un edificio.
- Ruido exterior.
- Ruido procedente de otros edificios.

Para determinar el valor exigido para cada caso es necesario identificar el uso o usos del edificio para zonificarlo.

Para determinar los valores de aislamiento acústico a ruido interior (aéreo y de impactos entre recintos) deberá zonificarse el edificio e identificar las diferentes unidades de uso. Posteriormente se identificarán los recintos que no son una unidad de uso (recinto de instalaciones, de actividad, ruidosos...). La importancia de la zonificación radica en lo siguiente:

- A efectos de ruido interior, los recintos no habitables no tienen exigencias de aislamiento acústico.
- Las exigencias de aislamiento acústico entre un recinto y el exterior se aplican únicamente a los recintos protegidos del edificio, pertenezcan o no a una unidad de uso.
- Las exigencias de aislamiento acústico entre edificios se aplican a todos los recintos protegidos y habitables colindantes con otro edificio, es decir, en contacto con una medianería.

Determinación de los valores límite de aislamiento a ruido aéreo y de impacto exigidos por los diferentes recintos. Ruido interior.

Ruido aéreo:

Los valores límite de aislamiento a ruido aéreo quedan establecidos en el apartado 2.1.1 del DB-HR, donde además se contemplan situaciones particulares en las cuales la exigencia de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos $D_{nT,A}$, se sustituye por valores mínimos del índice global de reducción acústica R_A , índice medido en laboratorio referido a elementos constructivos. Los casos supuestos son los siguientes:

- Elementos de separación verticales con puertas o ventanas dispuestas entre un recinto de una unidad de uso y cualquier otro recinto del edificio no perteneciente a la unidad de uso y que no se instalaciones o de actividad. Por ejemplo, los elementos de separación verticales entre una vivienda y el vestíbulo de acceso.
- Elementos de separación verticales con puertas entre un recinto habitable y un recinto de instalaciones o de actividad.
- Tabiquería interior de las viviendas.
- El recinto del ascensor, siempre que la maquinaria del mismo esté situada en un cuarto de máquinas independiente.

Ruido de impactos:

Las características que deben cumplir los elementos constructivos de separación horizontales conjuntamente con los elementos constructivos adyacentes se especifican en el apartado 2.1.2 del DB-HR.

La actuación sobre el forjado es el modo más efectivo a aislar a ruido de impacto de un recinto, realizándose sobre el forjado superior en el caso de transmisión de ruido de impactos entre recintos superpuestos o en el forjado del recinto colindante si es el caso de transmisión entre recintos adyacentes. La normativa extiende el uso de suelos flotantes a prácticamente la totalidad de recintos del edificio como manera más efectiva de aislar el ruido de impactos ya que aunque las exigencias de aislamiento no son de aplicación en recintos habitables si lo son para recintos protegidos colindantes con cualquier unidad o recinto del edificio, siendo muy probable la existencia de un recinto habitable en contacto con uno protegido.

Determinación de las exigencias de aislamiento acústico entre recintos y el exterior. Ruido exterior.

El DB-HR en su tabla 2.1 fija las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo entre un recinto y el exterior en función del índice de ruido día L_d , es decir, en función del nivel de ruido de la zona donde se ubica el edificio. Este valor puede obtenerse mediante consulta de los mapas estratégicos de ruido elaborados por las administraciones competentes. Cabe la posibilidad de que poblaciones pequeñas o con desarrollos urbanísticos nuevos, carezcan de mapas estratégicos de ruido así como poblaciones y ejes viarios o ferroviarios que no los hayan finalizado, ciñéndose a los plazos establecidos en la Ley del Ruido. Para estos supuestos, según sea la zona acústica pueden adoptarse los siguientes valores:

- Sectores con predominio de uso residencial: $L_d = 60$ dBA.
- Resto de sectores: Será de aplicación la tabla A del Anejo II del RD 1367/2000, que establece los objetivos de calidad para cada tipo de área acústica.

Es importante recordar que estas exigencias sólo se aplican a los recintos protegidos del edificios, sean pertenecientes o no a una unidad de uso, quedando exentos los recintos habitables.

Determinación de las exigencias de aislamiento acústico procedente de otros edificios. Medianerías.

El DB-HR establece que:

- El aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{2m,nT,Atr}$ de la medianería no será inferior a 40 dBA. Esta exigencia se debe cumplir en la etapa de proyecto ya que generalmente el proyectista desconocerá la distribución y geometría del

edificio colindante, lo normal será proyectar el cerramiento del edificio propio cumpliendo con la exigencia de aislamiento acústico a ruido aéreo

- El aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{nT,A}$ correspondiente al conjunto de los dos cerramientos, no será menor que 50 dBA. Esta exigencia sólo tiene validez a efectos de medición y siempre que el edificio colindante esté construido.

En lo referente a ruido de impacto, no existen exigencias de aislamiento entre dos edificios colindantes ni con una arista común.

4.1.1.2. Definición de los elementos constructivos.

Opción general.

Se aporta una herramienta informática para su aplicación y permite comprobar si las soluciones constructivas que se diseñaron satisfacen los requisitos establecidos por el DB-HR. La herramienta constituye un procedimiento de cálculo basado en el modelo simplificado para la transmisión acústica estructural de la norma UNE EN 12354 partes 1, 2 y 3. Tras identificar las exigencias y los casos más desfavorables se ha de proceder a comprobar de forma independiente para parejas de recintos, teniendo en cuenta su tipología, si las soluciones constructivas que se pretenden ejecutar proporcionan el aislamiento acústico requerido para ambos recintos. Al final del cálculo se obtiene el aislamiento cuantificado con la magnitud que define cada exigencia (ruido aéreo entre recintos, ruido aéreo respecto del exterior y ruido de impactos)

Opción simplificada.

Aunque el conjunto de elementos constructivos influyen en su totalidad en el aislamiento acústico de un edificio, la opción simplificada que propone el DB-HR consiste en una serie de tablas donde figuran los valores mínimos de aislamiento acústico para cada uno de los elementos constructivos, valores que figuran en el CEC (Catálogo de Elementos Constructivos). Por consiguiente, la elección de los diferentes elementos constructivos que cumplan los valores de las tablas satisfacen simultáneamente las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo y de impactos siempre y cuando se cumplan las condiciones relativas a la ejecución de los elementos constructivos y al diseño de los encuentros de los mismos.

La opción simplificada está pensada para edificios de uso residencial aunque su aplicación también es válida para edificios de otros aunque hay que tener en cuenta que seguramente se obtenga un aislamiento mayor en algunos recintos. Por otra parte, esta opción es válida para edificios con forjados de hormigón macizos o elementos aligerantes, así como forjados mixtos de hormigón y chapa de acero. No es válida para forjados de madera.

Clasificación de las particiones según DB-HR.

El DB-HR establece la siguiente clasificación de las particiones interiores existentes en un edificio:

- Tabiquería
- Elementos de separación verticales, ESV, que separan:
 - Una unidad de uso de cualquier edificio habitable o protegido del edificio.
 - Un recinto habitable o protegido del edificio de un recinto de instalaciones o de actividad.
- Elementos de separación horizontales, ESH, que separan:
 - Una unidad de uso de cualquier edificio habitable o protegido del edificio.
 - Un recinto habitable o protegido del edificio de un recinto de instalaciones o de actividad.

Ruido interior. Aislamiento acústico de recintos.

Cuando se determinan las condiciones de aislamiento acústico a ruido interior se tiene en cuenta elementos como la fachada y el forjado dado que desde el punto de vista acústico, la fachada y los forjados además de ser parte de la envolvente del edificio son elementos que influyen notablemente en la transmisión del ruido y vibraciones entre recintos. Debe estudiarse conjuntamente las condiciones de la fachada y del forjado para que puedan proyectarse correctamente los elementos de separación verticales con el fin de satisfacer las exigencias relativas al aislamiento acústico a ruido interior.

Tabiquería.

La tabiquería la forman el conjunto de particiones interiores de una unidad de uso. A efectos del cumplimiento de la opción simplificada no se considera tabiquería aquellas particiones que no encierran un espacio, por ejemplo un muro que no llega hasta el techo. Se contemplan los tipos siguientes (ver fig. 4.1):

- Tabiquería de fábrica con apoyo directo: Tabiquería de fábrica o de paneles prefabricados cerámicos, de hormigón o de yeso, apoyada en el forjado sin interposición de bandas elásticas.
- Tabiquería de fábrica con apoyo elástico: Pueden diferenciarse a su vez en:
 - Tabiques de fábrica, paneles prefabricados cerámicos, de hormigón o yeso con bandas elásticas dispuestas en su base.

- Tabiques de fábrica, paneles prefabricados cerámicos, de hormigón o de yeso apoyados en el suelo flotante. Se considera que la tabiquería de fábrica apoyada en el suelo flotante tiene apoyo elástico pues entre ésta y el forjado se interpone el material aislante a ruido de impactos que independiza tabique y forjado.
- Tabiquería de entramado: Formada por placas de yeso laminado.

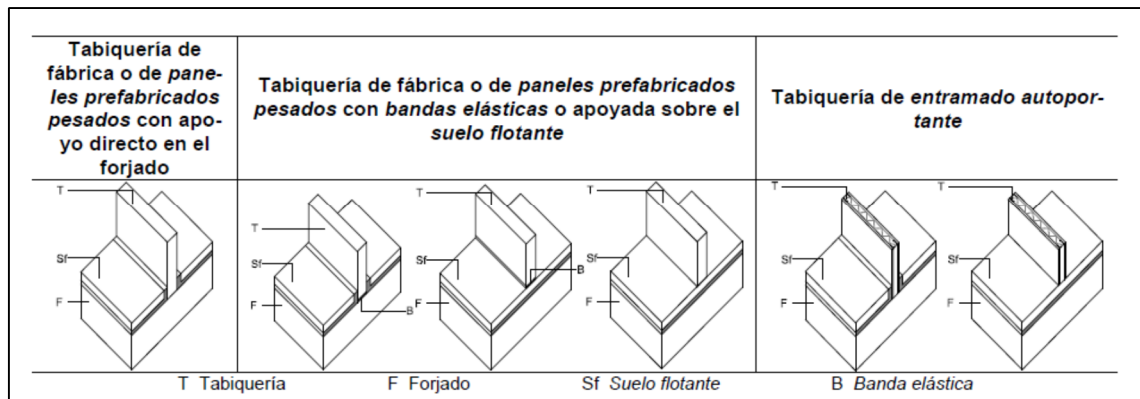


Fig. 4.1. Tipos de tabiquería que contempla el DB-HR.

Las transmisiones por flancos a través de la tabiquería son con frecuencia las transmisiones que más influyen negativamente en el aislamiento acústico de los elementos de separación horizontales por lo que el tipo de tabiquería es un condicionante que afecta a la elección de los elementos de separación, tanto verticales como horizontales.

Para limitar las transmisiones indirectas a través de la tabiquería, el DB-HR establece en la tabla 3.1 los valores a cumplir por la misma en cuanto a valores de masa e índice de reducción acústica.

Elementos de separación verticales. ESV.

La opción simplificada recoge los siguientes tipos de elementos de separación verticales (ver fig. 4.2):

Tipo 1.: Elementos mixtos formados por un elemento base acústicamente homogéneo que puede ser una hoja de:

- Fábrica de ladrillo, bloque de hormigón, bloque cerámico, etc.
- Hormigón armado.
- Paneles prefabricados de hormigón, cerámica o de yeso.

El elemento base puede trasdosarse o no. El DB-HR recoge tres tipos de trasdosados:

- Trasdoso autoportante. Se compone de placas de yeso laminado sujetas a una perfilera metálica autoportante. La cámara se rellena con un material absorbente acústico, como por ejemplo, lana mineral de baja densidad.
- Trasdoso adherido. Formado por un panel aislante adherido mediante mortero o atornillado a una perfilera auxiliar al elemento base. El panel aislante debe estar compuesto por un material absorbente acústico.
- Trasdoso cerámico. Compuesto por ladrillo hueco sencillo de espesor no menor que 5 cm con bandas elásticas en todo su perímetro. La cámara de separación entre el elemento base y el trasdoso debe tener un espesor mínimo de 4 cm e irá rellena de un material absorbente acústico.

Tipo 2. Formadas por dos hojas de fábrica con bandas elásticas en todo su perímetro.

Las bandas elásticas disminuyen las transmisiones indirectas a ruido aéreo y de impacto entre recintos hasta el punto de hacerlas despreciables, con el consecuente aumento del aislamiento acústico final. Son de poliestireno expandido elastificado o polietileno y se pegan con yeso o cualquier material que garantice una buena adherencia al resto de particiones.

Esta técnica permite diseñar espacios con particiones de dos hojas de fábrica ligeras que cumplan los requisitos de aislamiento acústico.

Este tipo a su vez se divide en dos grupos:

- Particiones formadas por dos hojas de fábrica con una masa por unidad de superficie de 150 kg/m^2 como máximo, que apoyan en bandas elásticas, con una cámara de separación no menor de 4 cm rellena de material absorbente acústico o amortiguador de vibraciones.
- Particiones formadas por una hoja de fábrica con $R_A > 42 \text{ dBA}$ y un trasdoso cerámico con una masa por unidad de superficie de 150 kg/m^2 como máximo con bandas elásticas instaladas en todo su perímetro. En lo referente a la cámara de separación y su relleno las características son idénticas al grupo anterior.

Tipo 3. Soluciones formadas por 4 ó 5 placas de yeso laminado sujetas a una perfilera doble autoportante.

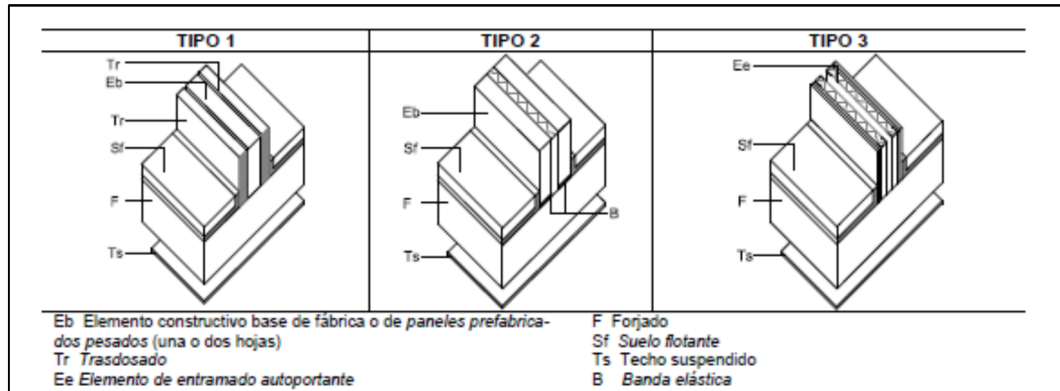


Fig. 4.2. Composición de los elementos de separación entre recintos según DB-HR.

— Empleo de la Tabla 3.2

La tabla 3.2 del DB-HR contiene los valores mínimos que deben cumplir los componentes de los elementos de separación verticales para los diferentes tipos que contempla la norma. Su cumplimiento se realiza, de forma general, eligiendo un tipo de elemento que cumpla los valores de las tablas simultáneamente, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Los elementos de tipo 1 deben cumplir para el elemento base con los valores de masa m e índice global de reducción acústica ponderado A , R_A . Para el trasdosado debe cumplir con los valores de ΔR_A , mejora del índice global de reducción acústica ponderado A .
- Los elementos de tipo 2 y tipo 3 cumplirán con los valores de m y R_A simultáneamente atendiendo además a las condiciones de compatibilidad con las fachadas.
- En la tabla, los valores entre paréntesis se refieren a valores a cumplir por los elementos de separación verticales que separen un recinto de instalaciones o un recinto de actividad de un recinto protegido o habitable del edificio.
- Los valores sin paréntesis corresponden a los valores que deben cumplir los elementos de separación verticales que separen unidades de uso diferentes o una unidad de uso de cualquier otro recinto.
- Las celdas sombreadas de la tabla se refieren a elementos constructivos inadecuados.
- Las celdas que contienen guiones hacen referencia a elementos de separación verticales que no necesitan trasdosados.

Un método de trabajo correcto para el uso de la tabla 3.2 consiste en la elección del ESV como primer paso. Posteriormente, en el CEC se buscarían los elementos que cumplan de forma simultánea con los valores de m y R_A atendiendo siempre al tipo de recinto, fruto de la zonificación realizada

previamente. Finalmente, si el tipo elegido es el tipo 1, en función de la tabiquería se escoge el tipo de trasdosado.

Elementos de separación horizontales. ESH.

A efecto de utilización de la opción simplificada, se elige el mismo elemento de separación horizontal para cada planta, excepto en zonas donde los recintos protegidos o habitables limiten con recintos de instalaciones o de actividad y se exige un aislamiento acústico mayor.

Los elementos de separaciones horizontales que cumplen con las exigencias de la norma se componen de:

- Un soporte estructural, por ejemplo un forjado o una losa.
- Un suelo flotante, formado por un material aislante a ruido de impactos sobre el que se dispone una capa rígida, que suele ser una capa de mortero de 4-5 cm de espesor. Pueden utilizarse también los denominados suelos secos, formados por varias placas de yeso laminado dispuestas sobre el material aislante. Las tarimas flotantes y las moquetas pese a tener un comportamiento bueno a ruido de impactos su aislamiento a ruido aéreo es nulo y su uso se restringe a forjados o losas de hormigón de masas altas o forjados con falso techo para cumplir con las exigencias del DB-HR
- Un falso techo en aquellos casos en los que se requiera un aislamiento mayor, por ejemplo forjados que limitan con recintos de instalaciones. El falso techo estará formada por una o varias placas de yeso laminado o escayola anclada al forjado. Se puede disponer un material absorbente acústico sobre el dorso de las placas y en la zona superior de la estructura portante con el fin de conseguir un mayor aislamiento acústico.

Para la utilización de la opción simplificada se emplean:

- Tabla 3.3 del DB-HR si el ESH separa unidades de uso diferentes o un recinto de instalaciones o de actividad de recintos protegidos y habitables del edificio.
- Tabla I.1 si el ESH no separa unidades de uso diferentes, pero éstas están separadas por ESV como es el caso de viviendas unifamiliares adosadas que comparten forjado.

— *Empleo de la Tabla 3.3*

Contiene los valores mínimos que debe cumplir cada uno de los parámetros acústicos que definen los elementos de separación horizontales. Para su uso se parten de las condiciones mínimas de los forjados en cuanto a masa por unidad de superficie que se ha proyectado por motivos estructurales.

En función del tipo de tabiquería de los recintos del edificio se elige un suelo flotante y/o un techo suspendido que cumpla con los siguientes parámetros:

Para suelos flotantes, los cuales deben cumplir simultáneamente:

- ΔR_A : mejora del índice global de reducción acústica ponderado A, en dBA.
- ΔL_w : reducción del nivel global de presión de ruido de impactos, en dB.

Los suelos flotantes con el valor ΔL_w requerido se instalarán en el forjado que delimita superiormente una unidad de uso y en el forjado en el que un recinto de instalación o actividad sea colindante o tenga aristas comunes con cualquier recinto habitable.

Para techos suspendidos:

- ΔR_A : mejora del índice global de reducción acústica ponderado A, en dBA.

El procedimiento de uso de la tabla 3.3 es el siguiente:

Como ocurría con la tabla 3.2, las casillas sombreadas se refieren a elementos constructivos inadecuados y entre paréntesis figuran los valores que deben cumplir los elementos de separación horizontales entre recintos protegidos o habitables y un recinto de instalaciones o actividad. Las casillas que contienen un 0 pueden referirse a que no necesitan falso techo o que el propio valor de ΔR_A sea 0.

Primeramente se elige el tipo de forjado que cumpla con los valores de m y R_A simultáneamente. Se elige el suelo flotante y el techo suspendido obteniéndose unos valores de ΔR_A y ΔL_w en función del tipo de tabiquería. El suelo flotante deberá cumplir esos valores de forma simultánea. Si el diseño del edificio no contempla el falso techo el valor que se toma del mismo es 0.

En cuanto a la tabiquería, si existen dos tipos diferentes, se eligen los valores de ΔR_A y ΔL_w más desfavorables. Si no hubiese elementos de tabiquería interior, de forma general se puede escoger cualquier forjado. También es conveniente resaltar la importancia de la comprobación de la existencia de incompatibilidades entre los elementos de separación horizontales con las fachadas.

— Empleo de la Tabla I.1

El procedimiento es análogo al descrito para el uso de la tabla 3.3

Ruido exterior.

La tabla 3.4 del DB-HR contiene los valores mínimos del índice global de reducción acústica para ruido de tráfico, $R_{A,tr}$ que deben cumplir los huecos y la parte ciega de la fachada, la cubierta o el suelo en contacto con el aire exterior.

Como dato de partido se conocen los niveles límites exigidos, obtenidos en la zonificación del edificio. En la tabla para cada nivel exigido de $D_{2m,nT,Atr}$ hay dos casillas que indican el valor mínimo de $R_{A,tr}$ de la parte ciega:

- “Parte ciega 100%”, que se utiliza para fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el exterior sin huecos.
- “Parte \neq ciega 100%”, que da tres opciones de valores de $R_{A,tr}$, que debe cumplir la parte ciega cuando la fachada tiene huecos. Se considera hueco la ventana o lucernario y también la caja de persiana y el aireador cuando estén integrados a la misma.

Hay que tener en cuenta que en la documentación técnica de fabricantes, las cajas de persiana pueden caracterizarse independiente o conjuntamente con la ventana. El Catálogo de Elementos Constructivos, por ejemplo, los caracteriza por separado. Las ventanas industrializadas se fabrican conjuntamente con el capialzado y se utilizan los valores de $R_{A,tr}$ del conjunto ventana y caja de persiana, el cual se halla mediante la fórmula propuesta en el anejo G del DB-HR para el cálculo de aislamiento mixto.

El Catálogo de Elementos Constructivos no recoge los aireadores porque son elementos industrializados y su diseño es específico para cada fabricante. Se caracterizan con el índice $D_{ne,A,tr}$, valor independiente de la superficie de huecos. Los modelos de aireadores más extendidos incorporan un cierre regulable desde el interior del edificio. La posición cerrada comporta unos valores de $D_{ne,A,tr}$ mayores que en su posición abierta. Si la ventana cuenta con aireador, puede utilizarse el valor del aislamiento conjunto en el caso de que lo proporcione el fabricante o puede calcularse mediante la expresión de aislamiento mixto incluida en el Anejo G del DB-HR si se disponen los valores de aislamiento para cada componente del hueco independiente.

— *Porcentaje de huecos.*

El valor exigido de $R_{A,tr}$ que deben cumplir los huecos varía en función del porcentaje de huecos, que se expresa como la relación entre la superficie de huecos y la superficie total de la fachada vista desde el interior de cada recinto protegido.

En el proceso de contabilizar el porcentaje se tendrá en cuenta que las ventanas pueden tener diferente índice de aislamiento $R_{A,tr}$ ya que no tiene el mismo porcentaje de huecos un salón que un dormitorio, por ejemplo. Para evitar la multiplicidad de ventanas con distinto aislamiento acústico se selecciona el caso más desfavorable, que es:

- El recinto con un índice de ruido día L_d mayor.
- El recinto de mayor porcentaje de huecos.
- El recinto con mayores exigencias de aislamiento acústico:

- En edificios de uso residencial y hospitalario serán los dormitorios.
- En edificios de uso cultural, sanitario, docente, administrativo serán las estancias.

— *Condicionantes de las fachadas.*

El aislamiento de una fachada o, en general, de un elemento perteneciente a la envolvente del edificio depende de los siguientes factores:

- El aislamiento de la parte ciega.
- El aislamiento del hueco.
- Los elementos constructivos conectados a la fachada que ocasionan transmisiones indirectas.
- Existencia de petos, balcones, voladizos...que modifican las reflexiones del sonido y disminuyen la presión acústica en el interior de los recintos.
- La absorción acústica del recinto.

El aislamiento acústico de la parte ciega. Los muros de fachada adoptan diferentes tipologías, desde cerramientos monocapa a multicapa, con el consecuente diferente comportamiento acústico. Hay que tener en cuenta que en ocasiones el sistema constructivo analizado en laboratorio no se comporta igual que en la práctica, véase el ejemplo de los muros de dos hojas trabadas mediante llaves por cuestiones estructurales. El sistema en realidad se comporta acústicamente como un sistema de una hoja, de masa la total del sistema.

La elección del material de relleno de los cerramientos constituye un factor de gran influencia desde el punto de vista acústico, siendo más aconsejable introducir en la cámara un material acústico absorbente poroso, no rígido. La tabla 4.1 ilustra la influencia de la porosidad del material de relleno sobre el $R_{A,tr}$ al trasdosar una hoja de yeso laminado sobre un elemento estructural y rellenando la cámara con un material de poro abierto (lana mineral) o de poro cerrado (poliestireno expandido).

Tabla 4.1. Relación entre material, espesor y $R_{A,tr}$.

Composición	Espesor (cm)	$R_{A,tr}$ (dBA)
○ Muro de hormigón ($m = 2300 \text{ kg/m}^3$)	16	50
○ Poliestireno expandido	8	
○ Placa de yeso laminado	1	
○ Muro de hormigón ($m = 2300 \text{ kg/m}^3$)	16	55-60
○ Lana mineral	8	
○ Placa de yeso laminado	1	

(Continúa)

<ul style="list-style-type: none"> ○ Enlucido exterior de mortero de cemento ○ Muro de ladrillo perforado ($m = 1200 \text{ kg/m}^3$) ○ Poliestireno expandido ○ Placa de yeso laminado 	<p>1</p> <p>22</p> <p>8</p> <p>1</p>	48
<ul style="list-style-type: none"> ○ Enlucido exterior de mortero de cemento ○ Muro de ladrillo perforado ($m = 1200 \text{ kg/m}^3$) ○ Lana mineral ○ Placa de yeso laminado 	<p>1</p> <p>22</p> <p>8</p> <p>1</p>	58

El aislamiento acústico de las ventanas. Los elementos de menor aislamiento, las ventanas y las cajas de persiana, son los que van a determinar el aislamiento acústico de una fachada. En el índice de reducción acústica de las ventanas hay que considerar lo siguiente:

- El vidrio: Los diferentes tipos de vidrio y su disposición suponen unos valores diferentes en lo referente al índice de reducción acústica. La utilización de ventanas con vidrios dobles separados 20 mm y con una relación 1:2 entre los espesores de los mismos suponen el mayor índice de reducción acústica. Otra opción es la utilización de vidrios laminares que mejora el comportamiento térmico y acústico de los vidrios monolíticos del mismo espesor.
- El bastidor de la ventana: Debe presentar poca permeabilidad al aire, tanto las partes móviles como las partes fijas. La existencia de juntas defectuosas disminuye el índice de reducción acústica.
- El sistema de apertura de la ventana: El índice de reducción acústica de las ventanas de apertura batiente es superior al de la ventana deslizante ya que el sistema de cierre de las últimas es muy permeable al aire y el ruido penetra por las holguras de las hojas.
- El cajón de la persiana: No considerar el aislamiento acústico a ruido aéreo tiene una influencia desfavorable de aproximadamente 5 dBA en el índice global de reducción acústica de la fachada de un recinto. La mejora se consigue con la colocación de bandas de estanqueidad, reforzar la estructura de la caja, aumentar la masa de la tapa de registro y realizar un tratamiento absorbente en su interior. Existen también cajones de persiana prefabricados que tienen excelentes aislamientos térmico y acústico, en ellos el cajón de la persiana va fijado a la ventana mediante un sistema de “clip” que facilita el montaje.
- Sobreacristalamientos: Se recurre a su uso en zonas con elevados niveles de ruido en el exterior. La hoja de la ventana la forman dos hojas que funcionan como una sola, permitiendo cristales de espesores considerables. También se suelen utilizar cuando se quiere prescindir del cajón de persiana y colocar una veneciana.
- Entradas de aire: En zonas muy ruidosas es necesario colocar en los recintos ventanas de Clase 3 o superior y cabe la posibilidad de que ocasionen condensaciones en los recintos interiores de los cerramientos.

Para evitarlo se incorporarán sistemas de renovación de aire estudiados acústicamente que permitan una correcta renovación de aire sin necesidad de abrir la ventana, es el caso de los aireadores, por ejemplo.

- Dimensiones de la ventana: En laboratorio, los ensayos del índice de reducción acústica se realizan sobre una muestra de aproximadamente 1,8 m². Cuando se lleve a cabo el cálculo del índice de reducción acústico de las fachadas se debe considerar que en dimensiones entre 2,7 y 3,6 m² el valor global de la ventana disminuye 1 dB y si está entre 3,6 m² y 4,6 m² se produce una disminución de 2 dB.
- Transmisiones a través de ventanas próximas: Si el aislamiento a ruido aéreo de las ventanas es pequeño y éstas se encuentran muy próximas, el ruido producido en un recinto puede transmitirse a otro a través de las ventanas. Se recomienda que la suma de los índices globales R_A de las ventanas sea como mínimo 10 dBA superior al índice global de reducción acústica ponderado A de la pared separadora.

La forma de la fachada. El efecto de la forma de la fachada de un recinto puede incrementar o disminuir la transmisión acústica. El anejo C de la Norma UNE-EN 12354-3 muestra ejemplos de la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada. Las correcciones por la forma de la fachada (ΔL_{fs}) pueden variar de -1 a 7 dB.

La mejora la producen los tratamientos absorbentes de los salientes, existencia de balcones antepechados, etc., acompañada la solución de un correcto tratamiento de absorción acústica en el techo origina una mejora de aproximadamente +6 dB.

Medianerías.

Para el caso particular de medianerías el DB-HR considera suficiente cualquier solución constructiva que tenga un índice de reducción acústico ponderado A, R_A , mayor que 45 dBA.

4.1.1.3. Criterios y recomendaciones de diseño. Encuentros entre elementos constructivos.

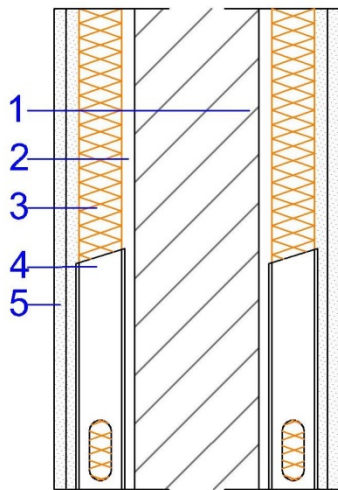
De forma complementaria al uso de las opciones general y simplificada que proporciona el DB-HR para la definición de los elementos constructivos, se deben seguir una serie de especificaciones relativas al diseño de dichos elementos y especialmente a los encuentros entre ellos.

Diseño de elementos constructivos.

Elementos de separación verticales.

Elementos de tipo 1: de fábrica con trasdosado por ambas caras.

A. Fábrica con trasdosado autoportante.



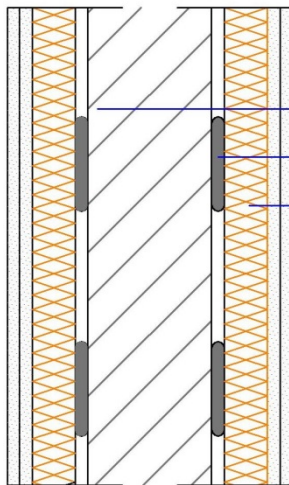
Componentes.

1. Hoja de fábrica o de hormigón vista o con revestimiento.
2. Espacio de separación ≥ 1 cm
3. Material absorbente acústico con una resistividad al flujo del aire $r \geq 5$ kPa · s/m²
4. Perfilaría formada por canales y montantes. El espesor mínimo de los canales será de 48 mm
5. Placas de yeso laminado.

Observaciones y recomendaciones.

- La altura máxima de los trasdosados autoportantes depende del ancho de la perfilaría, la modulación a ejes de los elementos verticales y del número de placas de yeso laminado.
- Las tuberías de instalaciones irán entre los perfiles procurando que queden lo más rectas posibles y se evitará que constituyan un contacto rígido entre las placas y la hoja interior de fábrica.
- Se utilizarán cajas especiales adaptadas a las placas de yeso laminado para los mecanismos eléctricos, tales como enchufes o interruptores.
- El espesor del material absorbente acústico irá acorde con el tipo de perfilaría.
- El espesor mínimo de cada placa de yeso laminado será de 15 mm si se utiliza una placa y de 12,5 mm si se utilizan dos o más placas.

B. Fábrica con trasdosado directo pegado o anclado al elemento de fábrica.



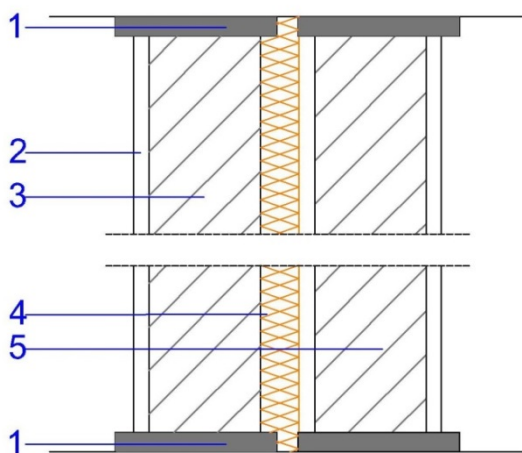
Componentes.

1. Hoja de fábrica o de hormigón vista o con revestimiento.
2. Pasta de agarre de yeso.
3. Panel prefabricado compuesto de una placa de yeso laminado y de un material absorbente acústico.

Observaciones y recomendaciones.

- Las rozas que se practiquen para el paso de instalaciones deben retacarse con mortero para no disminuir el aislamiento acústico del elemento base. Las cámaras de espesor inferior a 20 mm no deben aprovecharse para alojar instalaciones.
- Si van a discurrir una gran cantidad de conductos de instalaciones por el elemento de separación vertical se recomienda sustituir los trasdosados directos por trasdosados autoportantes.
- Se utilizarán cajas especiales adaptadas a las placas de yeso laminado para los mecanismos eléctricos, tales como enchufes o interruptores.
- La pasta de agarre de yeso puede aplicarse de diferentes maneras (a más ganar, con tientos, etc) atendiendo a las irregularidades de la superficie.

Elementos de tipo 2: De doble hoja de fábrica o paneles prefabricados pesados con bandas elásticas perimetrales en ambas hojas.



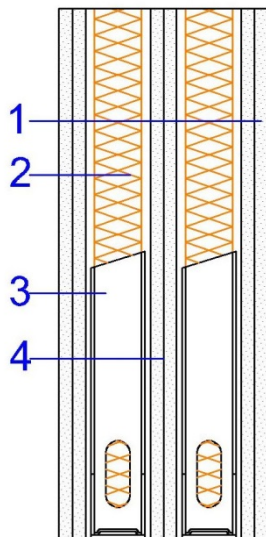
Componentes.

1. Bandas elásticas.
2. Revestimiento de las hojas.
3. Primera hoja de fábrica o de panel prefabricado pesado. La masa de cada hoja será $\leq 150 \text{ kg/m}^2$ y en función de lo especificado podrá ir revestida.
4. Material absorbente acústico.
5. Segunda hoja de fábrica o de panel prefabricado pesado. La masa de cada hoja será $\leq 150 \text{ kg/m}^2$

Observaciones y recomendaciones.

- La altura y longitud máxima de las hojas sin arriostrar depende del ancho de las fábricas.
- El espesor del material absorbente acústico irá acorde con el ancho de la cámara que se forme entre las dos hojas.
- En el caso de existir instalaciones centralizadas se recomienda comprobar que las conducciones que atraviesen la separadora tengan las medidas necesarias para evitar las transmisiones directas e indirectas, como por ejemplo la interposición de elementos elásticos (coquillas) y sellado hermético del paso realizado.

Elementos de tipo 3. De entramado metálico. Con o sin placa intermedia.



Componentes.

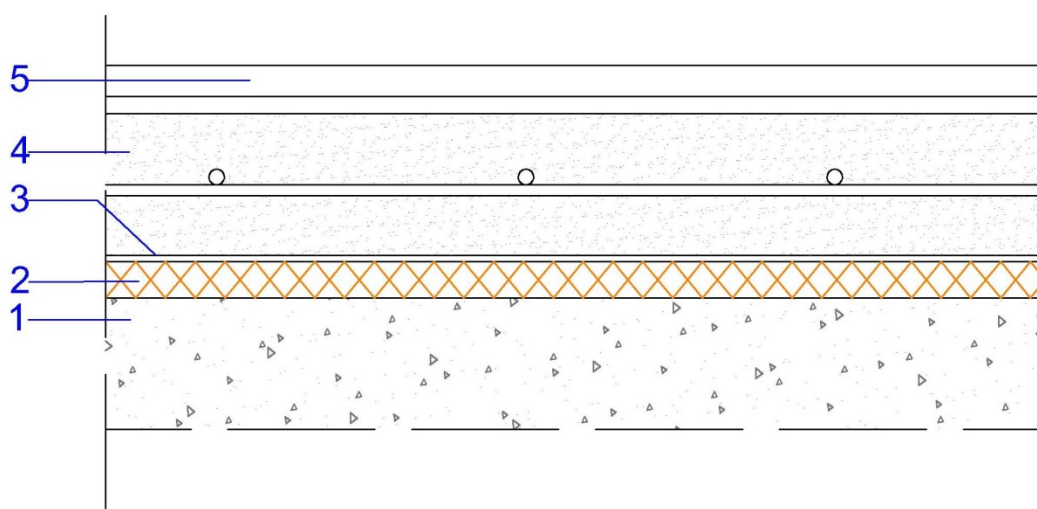
1. Placas de yeso laminado espesor mínimo: 12,5 mm
2. Material absorbente acústico.
3. Perfilería formada por canales y montantes. El espesor mínimo de los canales será de 48 mm

Observaciones y recomendaciones.

- La altura máxima de los elementos de entramado depende del tipo de la perfilería metálica, la modulación a ejes de los elementos verticales y el número de placas de yeso laminado. Si fuera necesario se arriostrarán los montantes con cartelas.
- Se recomienda emplear la solución con placa intermedia, ya que asegura la estanqueidad.
- El espesor del material absorbente acústico irá acorde con la perfilería utilizada.

Suelos flotantes.

A. Suelo flotante con solera de mortero.



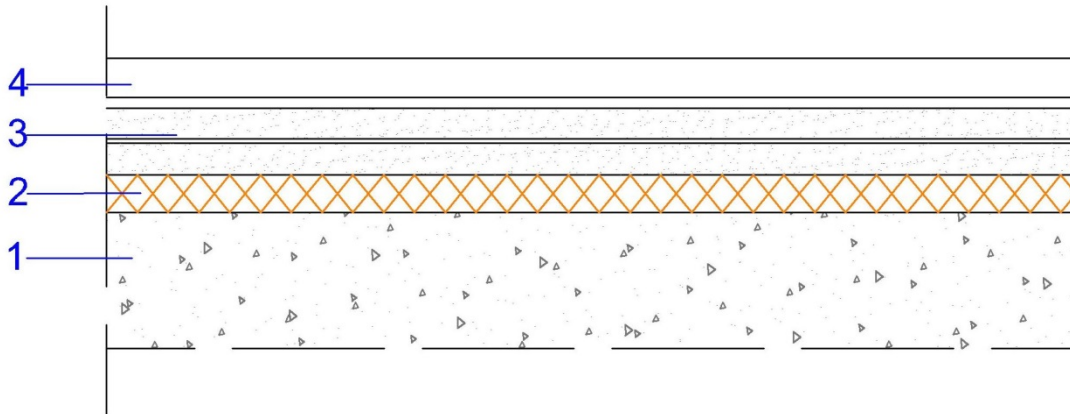
Componentes.

1. Soporte resistente.
2. Material aislante a ruido de impactos.
3. Barrera impermeable.
4. Capa de mortero de espesor mínimo: 15 mm
5. Acabado.

Observaciones y recomendaciones.

- El espesor del material aislante a ruido de impactos será el siguiente en función del tipo de material elegido:
 - Lana mineral (LM): entre 12 y 30 mm
 - Polietileno reticulado: 5, 10 mm
 - Polietileno expandido: 3, 5, 10 mm
 - Poliestireno expandido elastificado (EEPS): entre 20 y 40 mm
 - Láminas multicapa.
- La barrera impermeable será necesaria si el material es poroso (paneles de lana minera) o si juntas entre los paneles no están selladas (paneles de EEPS).
- La capa de mortero irá provista con un mallazo de reparto cuando sobre él apoyen cargas lineales, como la tabiquería.

B. Suelo flotante con solera seca.



Componentes.

1. Soporte resistente.
2. Material aislante a ruido de impacto.
3. Placas de yeso laminado.
4. Acabado.

Observaciones y recomendaciones.

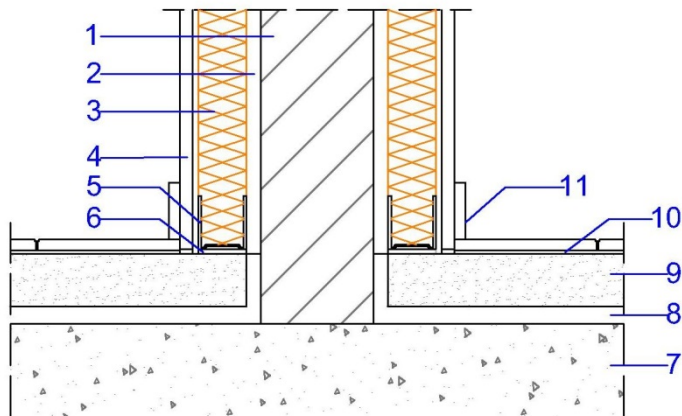
- Como material aislante a ruido de impacto podrá utilizarse lana mineral o EEPS con los espesores especificados en el caso de suelo flotante con solera de mortero.
- Se colocarán al menos dos placas de yeso laminado de 10 mm de espesor cada una.
- Se recomienda la disposición de una capa de nivelación de arena entre el forjado y la capa de material aislante a ruido de impacto para alojar instalaciones.

Encuentros entre elementos constructivos.

Elementos de separación verticales.

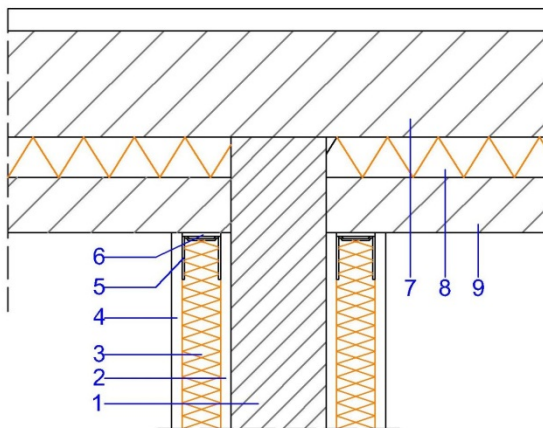
Elementos de tipo 1

— *Encuentro con forjado apoyado en suelo flotante con solera de mortero.*



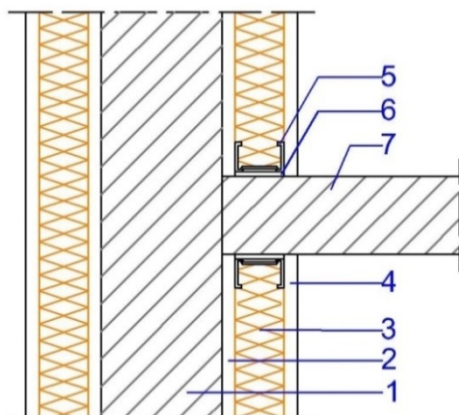
1. Hoja de fábrica o de hormigón.
2. Espacio de separación $\geq 1\text{cm}$
3. Material absorbente acústico
4. Placa de yeso laminado
5. Perfilera metálica.
6. Bandas de estanqueidad.
7. Forjado.
8. Material aislante a ruido de impactos.
9. Capa de mortero.
10. Acabado.
11. Rodapié

— *Encuentro con fachada no ventilada de dos hojas de fábrica.*



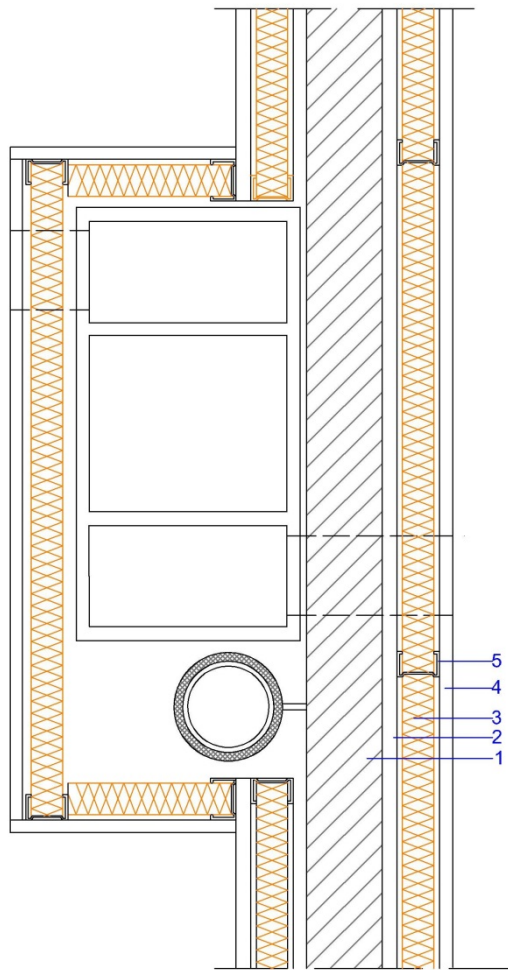
1. Hoja de fábrica o de hormigón.
2. Espacio de separación $\geq 1\text{cm}$
3. Material absorbente acústico
4. Placa de yeso laminado
5. Perfilera metálica.
6. Bandas de estanqueidad.
7. Hoja exterior de la fachada.
8. Cámara de la fachada. Puede estar rellena de material aislante.
9. Hoja interior de la fachada.

— *Encuentro con tabiquería interior de fábrica.*



1. Hoja de fábrica o de hormigón.
2. Espacio de separación $\geq 1\text{cm}$
3. Material absorbente acústico
4. Placa de yeso laminado
5. Perfilera metálica.
6. Bandas de estanqueidad.
7. Tabiquería interior de fábrica.

— *Encuentro con conductos de instalaciones.*



1. Hoja de fábrica o de hormigón.
2. Espacio de separación $\geq 1\text{cm}$
3. Material absorbente acústico
4. Placa de yeso laminado
5. Perfilera metálica.

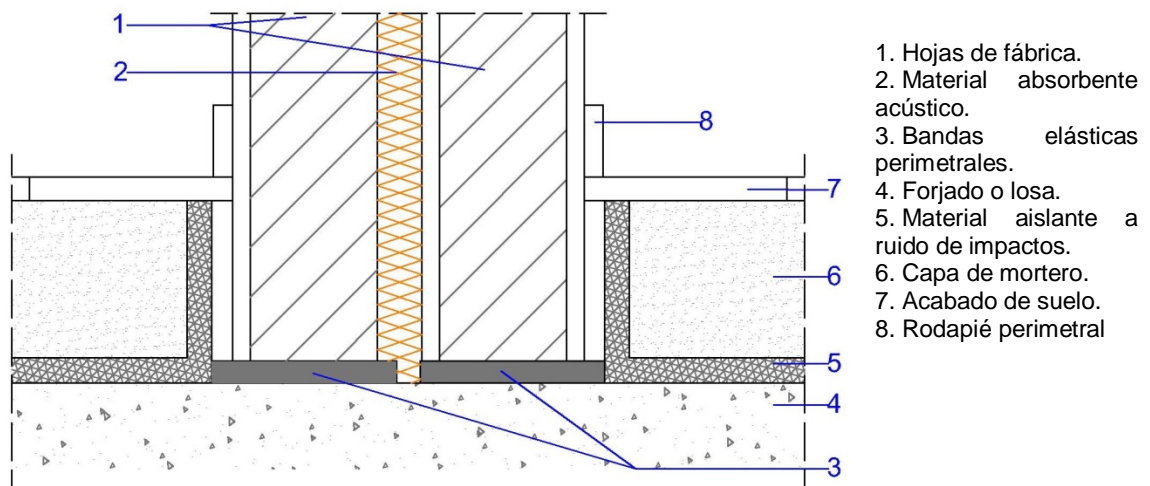
— *Observaciones y recomendaciones.*

- Se representan los encuentros correspondientes al trasdosado con perfilera autoportante, siendo análogos al trasdosado directo pegado o anclado al elemento de fábrica.
- Debe interponerse una capa de material aislante a ruido de impacto entre el suelo flotante y las particiones o pilares para evitar el contacto directo entre los elementos.
- El rodapié no debe conectar de forma simultánea el suelo y la partición, por lo que se recomienda colocar una junta elástica en la base del rodapié.
- El detalle correspondiente al encuentro con el forjado apoyado en suelo flotante con solera de mortero, también puede aplicarse en el caso de proyectarse una solera seca o una tarima flotante.

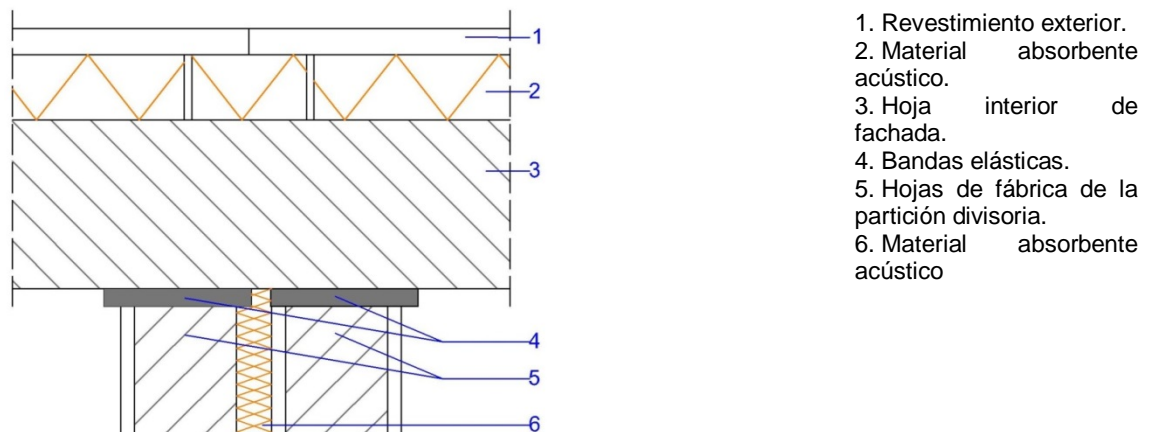
- Cuando el elemento de separación vertical delimite dos unidades de uso debe ser continuo. La tabiquería de fábrica irá unida a la hoja de fábrica a tope o trabada.
- Los montantes que se anclan a la hoja de fábrica deben llevar bandas de estanqueidad.
- Si un conducto de ventilación se adosa al elemento de separación vertical, la hoja de fábrica será continua y se trasdosará el conducto.
- Se recomienda que los patinillos tengan un trasdosado similar al empleado en los elementos de separación verticales.
- Si dos unidades de uso comparten el mismo conducto de extracción, se evitará que las bocas de extracción compartan el mismo conducto.

Elementos de tipo 2

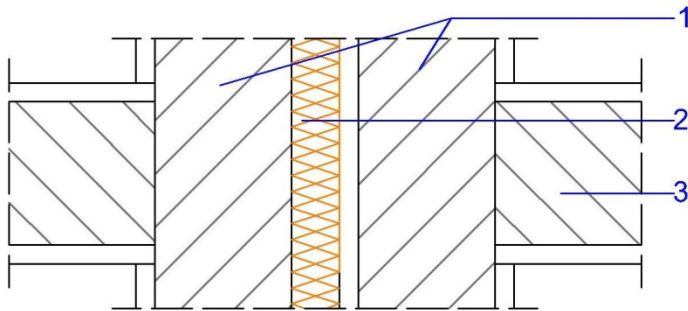
— Encuentro con forjado apoyado en suelo flotante con solera de mortero.



— Encuentro con fachada ventilada con hoja interior de fábrica.

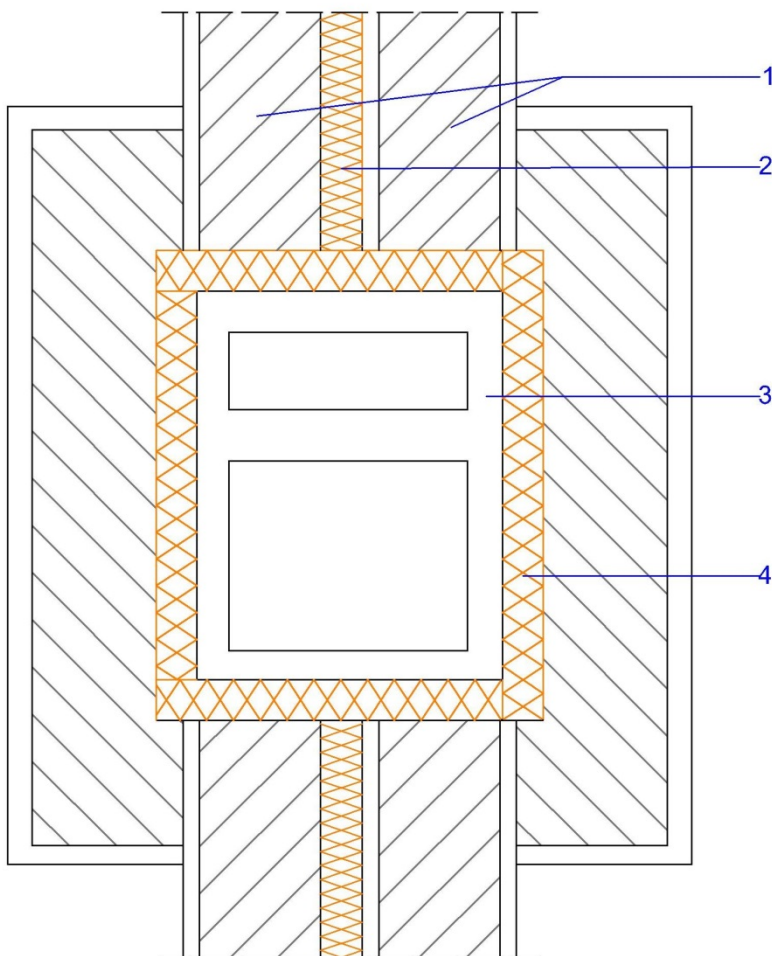


— *Encuentro con tabiquería interior de fábrica.*



1. Hojas de fábrica.
2. Material absorbente acústico.
3. Tabiquería de fábrica.

— *Encuentro con conductos de instalaciones.*



1. Hojas de fábrica.
2. Material absorbente acústico.
3. Conductos de instalaciones.
4. Material absorbente acústico de los conductos.

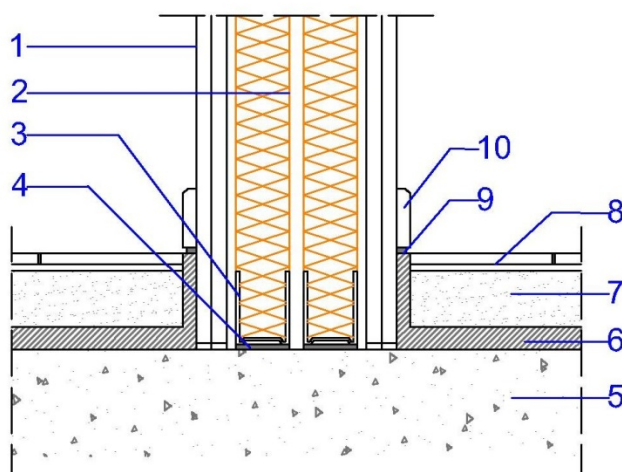
— *Observaciones y recomendaciones.*

- Debe interponerse una capa de material aislante a ruido de impacto entre el suelo flotante y las particiones o pilares para evitar el contacto directo entre los elementos.
- El rodapié no debe conectar de forma simultánea el suelo y la partición, por lo que se recomienda colocar una junta elástica en la base del rodapié.

- El detalle correspondiente al encuentro con el forjado apoyado en suelo flotante con solera de mortero también puede aplicarse en el caso de proyectarse una solera seca.
- Las tuberías que discurran por el suelo y que lleguen a la partición deben ir revestidas con un material elástico.
- Se recomienda que las bandas perimetrales tengan un ancho mayor que el de las hojas de fábrica si estas van a ir revestidas.
- Cuando el elemento de separación vertical delimite dos unidades de uso debe ser continuo.
- Para evitar la formación de puentes acústicos entre las dos hojas, los tabiques que acometan al elemento de separación vertical deben trabarse a una de las hojas del elemento de separación sin atravesar la cámara.
- Si un conducto de ventilación se adosa al elemento de separación vertical, la hoja de fábrica será continua y se trasdosará el conducto.
- Se recomienda que los conductos estén forrados de un material absorbente acústico.
- Si dos unidades de uso comparten el mismo conducto de extracción, se evitará que las bocas de extracción compartan el mismo conducto.

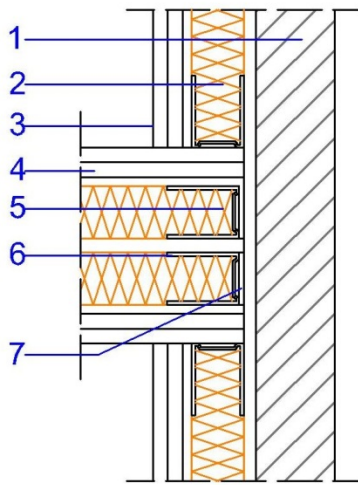
Elementos de tipo 3.

- *Encuentro con forjado apoyado en suelo flotante con solera de mortero.*



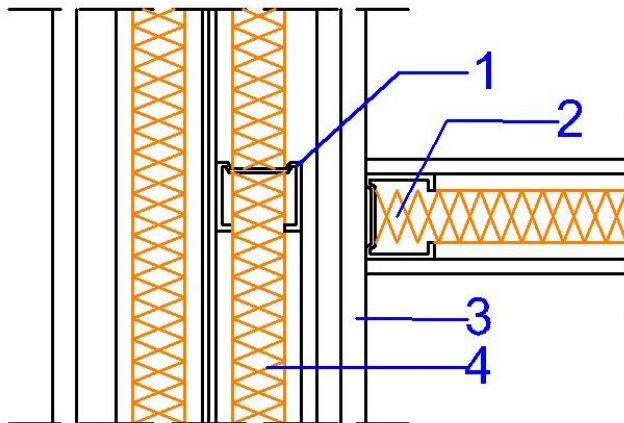
1. Placas de yeso laminado.
2. Material absorbente acústico.
3. Perfilaría metálica.
4. Bandas de estanqueidad.
5. Forjado.
6. Material aislante a ruido de impactos.
7. Capa de mortero.
8. Acabado de suelo.
9. Junta elástica.
10. Rodapié.

— *Encuentro con fachada ventilada de dos hojas, hoja exterior de fábrica y hoja interior de entramado.*



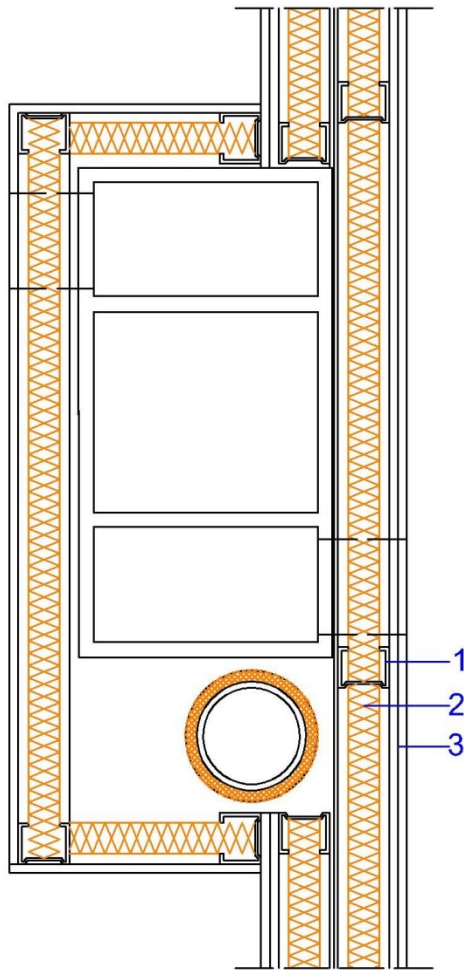
1. Hoja exterior de la fachada.
2. Material absorbente acústico de la hoja interior de la fachada.
3. Placas de yeso laminado de la hoja interior de la fachada,
4. Placas de yeso laminado
5. Material absorbente acústico.
6. Perfilera metálica.
7. Bandas de estanqueidad.

— *Encuentro con tabiquería interior de entramado.*



1. Perfilera metálica
2. Tabiquería interior de entramado, formada por perfilera metálica, material absorbente y placas de yeso laminado.
3. Placas de yeso laminado
4. Material absorbente acústico.

— *Encuentro con conductos de instalaciones.*



1. Perfilaría metálica
2. Tabiquería interior de entramado, formada por perfilaría metálica, material absorbente y placas de yeso laminado.
3. Placas de yeso laminado
4. Material absorbente acústico.

— *Observaciones y recomendaciones.*

- Debe interponerse una capa de material aislante a ruido de impacto entre el suelo flotante y las particiones o pilares para evitar el contacto directo entre los elementos. Si el material aislante a ruido de impactos no es impermeable, se interpondrá una capa impermeable entre el mortero y dicho material, para evitar el posible contacto del mortero con las placas de yeso laminado.
- El rodapié no debe conectar de forma simultánea el suelo y la partición, por lo que se recomienda colocar una junta elástica en la base del rodapié.
- Si se va a ejecutar el solado después de la partición se deberá interponer un film protector entre el solado y las placas de yeso laminado para protegerlas contra la humedad.
- El detalle correspondiente al encuentro con el forjado apoyado en suelo flotante también puede aplicarse en el caso de proyectarse una solera seca o una tarima flotante.

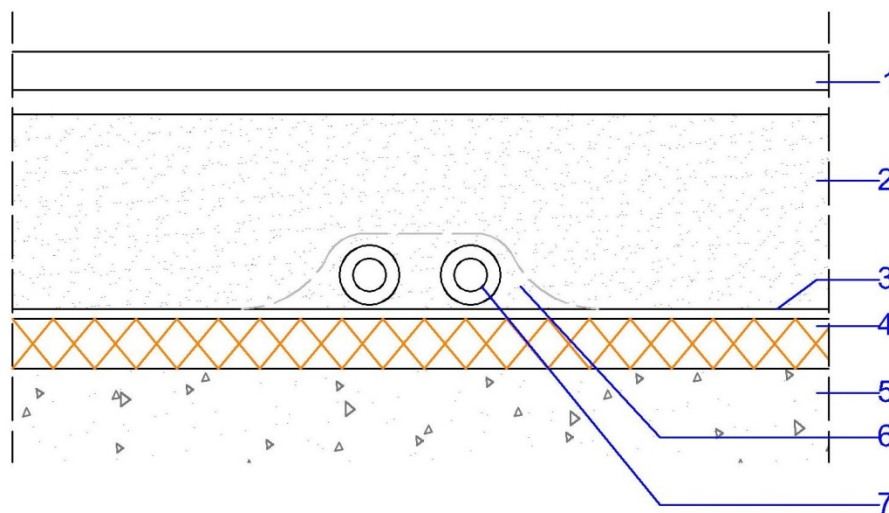
- Entre las hojas de la fachada representada en el detalle correspondiente puede existir una cámara no ventilada.
- Cuando el elemento de separación vertical delimite dos unidades de uso debe ser continuo.
- La tabiquería de entramado irá atornillada a las placas de yeso laminado del elemento de separación vertical.
- Si un conducto de ventilación se adosa al elemento de separación vertical, la hoja de fábrica será continua y se trasdosará el conducto.
- Si dos unidades de uso comparten el mismo conducto de extracción, se evitará que las bocas de extracción compartan el mismo conducto

Suelos flotantes.

Suelo flotante con solera de mortero.

— *Encuentro con tuberías de instalaciones.*

o *Opción A*

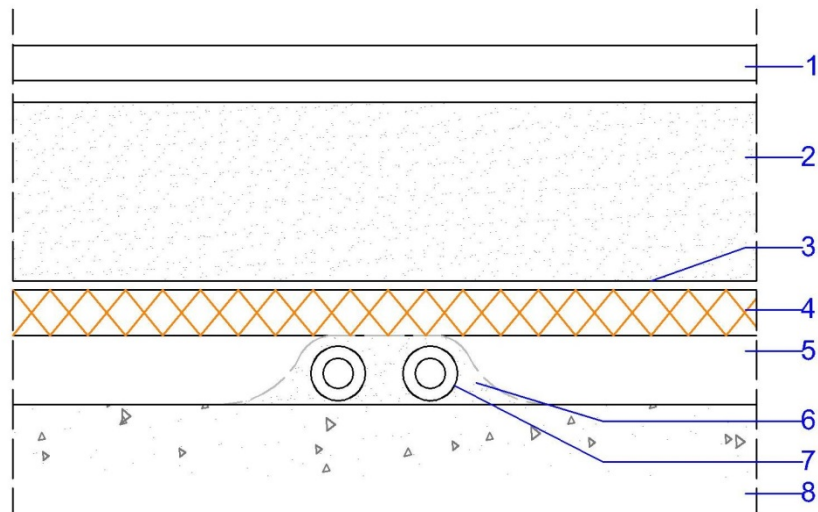


1. Acabado de suelo.
2. Capa de mortero.
3. Barrera impermeable.

4. Material aislante a ruido de impactos.
5. Forjado o losa.

6. Mortero de protección para los tubos.
7. Tuberías de instalaciones

o *Opción B.*



1. Acabado de suelo.
2. Capa de mortero.
3. Barrera impermeable.

4. Material aislante a ruido de impactos.
5. Capa niveladora.

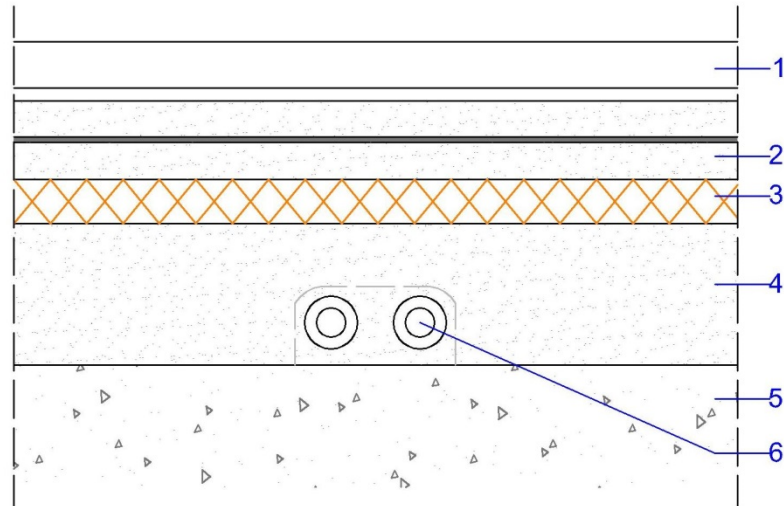
6. Mortero de protección.
7. Tuberías de instalaciones.
8. Forjado o losa.

— *Observaciones y recomendaciones.*

- Las tuberías pueden llevarse sobre el material aislante a ruido de impacto o bajo el mismo.
- Independientemente de la disposición elegida, las tuberías que discurran por el suelo flotante no pueden conectar el forjado con la capa de mortero e irán protegidas con coquillas de un material elástico.
- Si se opta por llevarlas por encima del suelo flotante debe utilizarse la disposición que representa la opción A del detalle.
- Si los paneles no permiten la configuración anterior, como puede ser el caso de los paneles EEPS o LM, las tuberías deben llevar una capa niveladora de relleno para evitar que el vertido del mortero deteriore el material aislante (opción B).

Suelo flotante con solera seca.

— Encuentro con tuberías de instalaciones.



1. Acabado de suelo.
2. Placas de yeso laminado.
3. Material aislante a ruido de impactos.
4. Capa niveladora.
5. Forjado.
6. Tuberías de instalaciones.

Observaciones y recomendaciones.

- Las tuberías no pueden poner en contacto las placas de yeso laminado con el forjado.
- Si las tuberías se llevan por el suelo, siempre lo harán bajo el material aislante.
- Para salvar el desnivel, se colocará una capa niveladora. Si esta capa es de arena o de otro material granular, se recomienda instalar por encima una placa de yeso para distribuir el peso.

4.1.1.4. En obra.

Control de recepción en obra de los productos.

- Figurarán en el pliego de condiciones las condiciones particulares de control para la recepción de los productos que forman los elementos constructivos y, si fuese necesario, los ensayos necesarios para comprobar que los mismos reúnen las características exigidas.
- Se comprobará que los productos recibidos corresponden a los especificados en el pliego de condiciones del proyecto.

- Se seguirán los criterios indicados en el artículo 7.2 de la parte I del CTE el control de recepción en obra. Este control comprende el control de la documentación de los suministros, el control mediante distintivos de calidad o evaluaciones técnicas de idoneidad y el control mediante ensayos.

Ejecución en obra.

- Una correcta ejecución en obra supone un factor de capital importancia para el cumplimiento de requisitos acústicos. Por ello, se ha de realizar una completa y minuciosa vigilancia de la calidad de ejecución en aspectos como los siguientes:
 - Correcto enfoscado: se deben evitar las fisuras e intersticios con el fin de garantizar la estanqueidad de las soluciones. El espesor del enfoscado no debe ser inferior a 15 cm.
 - Colocación correcta de materiales absorbentes porosos en las cámaras de tabiques dobles: el material absorbente debe cubrir toda la superficie y, si éste no rellena el ancho total de la cámara, debe fijarse a una de las hojas para evitar su desplazamiento.
 - Si se va a ejecutar una solución constructiva de tabique doble, no se deben levantar al mismo tiempo para evitar uniones rígidas entre ellos.
 - Correcta ejecución de los suelos flotantes. La capa de compresión del forjado deberá estar completamente limpia para la instalación del material aislante, que además debe ser continuo a lo largo del forjado.
 - Las juntas entre las placas de yeso laminado y de las placas de los demás elementos constructivos deben tratarse con pastas y cintas para garantizar su estanqueidad.
 - En soluciones formadas por varias capas superpuestas de placas de yeso laminado deben contrapearse las placas, de forma que no coincidan las juntas entre las placas ancladas a un mismo lado de la perfilería.
 - En el caso de trasdosados autoportantes aplicados a un elementos de fábrica, se eliminarán todas las rebabas y se dejarán a menos 10 mm de separación entre la fábrica y los canales de la perfilería.
 - Para techos suspendidos que contengan un material absorbente en la cámara, éste rellenará de forma continua la superficie de la placa y reposará en el dorso de las mismas y en las zonas superiores de la estructura portante. Se prestará especial atención al sellado de juntas perimétricas y al cierre del plenum

4.1.2. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

En cuanto al acondicionamiento acústico, el DB HR limita el ruido reverberante de determinados recintos mediante:

- La absorción acústica de las zonas comunes.
- El tiempo de reverberación máximo de aulas y salas de conferencias de $V \leq 350 \text{ m}^3$, comedores y restaurantes.

El procedimiento de aplicación del DB HR para acondicionamiento acústico se realiza en la fase de proyecto de ejecución

4.1.2.1. Identificación de los recintos.

Primeramente se identificarán los recintos del edificio que quedan dentro del ámbito de aplicación del DB-HR.

Zonas comunes.

Las zonas comunes de edificios de uso residencial público, docente y hospitalario son susceptibles del cumplimiento de los valores mínimos de absorción acústica. Esta exigencia sólo se aplica a aquellas zonas comunes colindantes con recintos protegidos del edificio que con las que compartan puertas.

Quedan fuera de la exigencia las zonas comunes de edificios de viviendas.

Aulas, salas de conferencias, comedores y restaurantes.

Los valores máximos de tiempo de reverberación se aplican a los siguientes recintos sea cual sea el uso del edificio y considerando el recinto vacío, sin ocupación y sin mobiliario, exceptuando el mobiliario fijo.

- Aulas y salas de conferencias de volumen $V \leq 350 \text{ m}^3$.
- Comedores y restaurantes de cualquier volumen.

4.1.2.2. Determinación de las exigencias.

El DB-HR en el punto 2.2 establece los valores mínimos de absorción acústica, indicando que el área de absorción acústica equivalente, A , de las zonas comunes debe ser al menos $0,2 \text{ m}^2$ por m^3 de recinto, debiéndose verificar que la absorción propuesta en el proyecto es mayor o igual a la requerida en cada zona común que sea diferente en forma, tamaño y elementos constructivos.

En el mismo punto se indican también los valores máximos del tiempo de reverberación según el tipo de recinto, debiendo verificarse que $T_{\text{recinto}} \leq T_{\text{limite}}$

exigido, como mínimo, en cada recinto que sea diferente en forma, tamaño y elementos constructivos. Los valores son los siguientes:

- Aulas y salas de conferencias vacías: $T \leq 0,7$ s
- Aulas y salas de conferencias vacías, pero con butacas fijas: $T \leq 0,5$ s
- Comedores y restaurantes: $T \leq 0,9$ s

4.1.2.3. Verificación de las exigencias.

El punto 3.2 del DB-HR propone un método de cálculo para el cálculo del tiempo de reverberación y de la absorción acústica. Este método es aplicable sólo a aulas y salas de conferencias con formas prismáticas rectas o asimilables. En el caso de recintos con formas abovedadas no garantiza un confort acústico, ya que pueden producirse concentraciones de sonido y sería necesario un estudio específico.

Para el cálculo del tiempo de reverberación y de la absorción acústica es necesario conocer:

- Los valores del coeficiente de absorción acústica α de los acabados
- El área de absorción acústica de los objetos A_O

El coeficiente α se puede obtener del Catálogo de Elementos Constructivos y aparece expresado por bandas de octava, por lo que para hallar α_m para introducirlo en la fórmula es necesario hacer la media aritmética de las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz. En ocasiones el coeficiente de absorción de un material viene expresado como α_w , coeficiente ponderado según la norma UNE EN ISO 11654. Si se desconocen más datos puede utilizarse en los cálculos el coeficiente α_w , ya que debido al procedimiento de ponderación, su valor es inferior al valor α_m para las frecuencias 500, 1000 y 2000.

El área de absorción acústica de los objetos A_O se expresa en m^2 y se define como la absorción de una superficie con coeficiente de absorción acústica igual que 1 pero con área igual a la absorción total del elemento. Se utiliza en el DB-HR para el mobiliario fijo, como pueden ser las butacas fijas de las aulas y en una zona común se puede despreciar su valor al carecer estos espacios de mobiliario que aporte mejoras a la absorción.

Cálculo de la absorción acústica:

La absorción acústica A se calcula a partir de la expresión:

$$A (m^2) = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{O, m,i} + \overline{4 m_m} \cdot V$$

Dónde:

$\alpha_{m,i}$: Coeficiente de absorción acústica media de cara paramento para las bandas de tercio de octava centradas en las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

S_i : Área de paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i , m²

$A_{O,m,i}$: Área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente, m²

\bar{m}_m : Coeficiente de absorción acústica medio en el aire para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz y de valor 0,006 m⁻¹

V: Volumen del recinto, m³

Cálculo del tiempo de reverberación:

El tiempo de reverberación, T, de un recinto se calcula mediante la expresión:

$$T \text{ (s)} = 0,16 \frac{V}{A}$$

Dónde:

V: volumen del recinto, m³

A: absorción acústica total del recinto, m²

La importancia de la elección de los materiales.

La elección de los revestimientos o acabados de las superficies de los recintos tienen una gran influencia en su acondicionamiento acústico. De los materiales absorbentes acústicos, los más utilizados en construcción son:

- Materiales porosos. Los materiales porosos que son buenos absorbentes acústicos son aquellos que tienen poros interconectados. Los aislantes de célula cerrada dan un resultado bastante deficiente.
- Los paneles resonadores. Se utilizan en aplicaciones específicas ya que su absorción es selectiva en un rango concreto de frecuencias. Existen dos tipos de aplicación extendida en la construcción:
 - Resonadores de membrana: paneles separados de una partición con la cámara rellena parcial o totalmente de lana mineral.
 - Paneles perforados: separados también del paramento una cierta distancia y con la cámara rellena parcial o totalmente de lana mineral. Si las perforaciones superan el 12% de la superficie del panel su absorción es la misma que la del material dispuesto en la cámara siendo la opción más utilizada en edificación.

Los materiales absorbentes suelen distribuirse de forma uniforme en el techo que independientemente de las condiciones acústicas, desde el punto de vista de mantenimiento es la opción más favorable dado que son materiales frecuentemente blandos y degradables con el roce.

Recomendaciones sobre el diseño de aulas y salas de conferencia.

En el Anejo J del DB-HR se exponen unas recomendaciones sobre la geometría de los recintos y la distribución de los materiales absorbentes de aulas y salas de conferencias con objeto de mejorar la inteligibilidad de la palabra:

- Se deben evitar recintos cúbicos o con proporciones entre lados que sean números enteros.
- A igual valor de absorción acústica total de los elementos que componen el recinto, resulta más recomendable la disposición de un pasillo central que dos pasillos laterales para la circulación de personas.
- Se proponen dos opciones para la distribución de los materiales absorbentes, igualmente válidas desde el punto de vista acústico.
 - Opción 1. La superficie del techo irá cubierta de un material absorbente acústico, la pared frontal será reflectante y la pared trasera será absorbente para minimizar ecos.
 - Opción 2. La superficie del techo irá cubierta de un material absorbente acústico pero solo cubrirá la parte trasera del techo, dejando una banda de 3 m de ancho de material reflectante en la parte delantera del techo. La pared frontal será reflectante y la pared trasera estará cubierta de un material absorbente acústica de similares características al techo.

4.1.3. RUIDO Y VIBRACIONES DE LAS INSTALACIONES.

El apartado 3.3 del DB-HR hace referencia a las siguientes cuestiones relacionadas con el ruido y vibraciones de las instalaciones:

- Datos a aportar por los suministradores.
- Condiciones de montaje de equipo generadores de ruido estacionario:
 - Equipos situados en recintos de instalaciones.
 - Equipos situados en recintos protegidos.
 - Equipos situados en cubiertas y zonas exteriores anejas.
- Conducciones y equipamiento: hidráulicas, aire acondicionado, ventilación, eliminación de residuos y ascensores y montacargas.

Las exigencias en cuanto a ruido y vibraciones de las instalaciones se consideran satisfechas si se cumple lo especificado en el apartado 3.3 del DB-HR.

4.1.3.1. Encuentros entre elementos constructivos e instalaciones.

Lo relativo a los encuentros entre elementos constructivos e instalaciones se desarrolló de forma pormenorizada para cada elemento y de con apoyo gráfico en el apartado 4.1.1.3. De forma genérica, se podía resumir en lo siguiente:

- Si un conducto de instalaciones colectivas va adosado a un elemento de separación vertical, se revestirá de forma que no disminuya el aislamiento acústico del elemento de separación y garantizará la continuidad de la solución constructiva.
- Se revestirán los conductos de instalaciones que discurran bajo el suelo flotante de un material elástico con el fin de eliminar los contactos entre ambos.
- Si un conducto de instalaciones atraviesa un elemento de separación horizontal, irá recubierto y se sellarán las holguras de los huecos efectuados en el forjado con un material elástico, impidiendo así el paso de vibraciones a la estructura del edificio.

4.1.3.2. Instalaciones en cubiertas del edificio.

- Se cubrirán las cubiertas y azoteas en general con suelos flotantes. Para los equipos con grandes cargas unitarias se recomienda la ejecución de una losa de hormigón de 8 cm de espesor sobre la cual se instalará el suelo flotante.
- Los sistemas de soporte de equipos ruidosos podrán ser de los siguientes tipos:
 - Sistema Silentblock.
 - Amortiguadores.
 - Estructuras metálicas o bancadas independientes.
- Se requerirá un control de las emisiones por ruido aéreo si mediante cálculo o simulación acústica se determina que el nivel sonoro a nivel de la fachada más desfavorable supera los 45 dBA por las emisiones de los equipos instalados en la cubierta. En este caso la atenuación acústica se realizará por:
 - Silenciadores.
 - Rejillas acústicas.
 - Pantallas acústicas.
 - Encapsulamientos.

4.2. REHABILITACIÓN ACÚSTICA.

En el apartado 4.1 de este capítulo se desarrolló la integración de la calidad acústica en los procesos constructivos dentro de marco reglamentario del CTE

atendiendo al ámbito de aplicación del DB-HR, que resulta el mismo que CTE y la LOE. En él se incluyen obras de edificación de nueva construcción y obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación que se realicen en edificios existentes, siempre y cuando dichas obras sean compatibles con la naturaleza de la intervención que se pretende realizar y de ser el caso, con el grado de protección de los edificios. Si bien la redacción del CTE tiene un claro enfoque hacia la obra nueva, el DB-HR resulta incluso más restrictivo en cuanto a los casos en los que deben cumplirse las exigencias a aislamiento acústico en las rehabilitaciones, como queda patente en su artículo 4.2, apartado d):

“Las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación en los edificios existentes, salvo cuando se trate de rehabilitación integral. Asimismo quedan excluidas las obras de rehabilitación integral de los edificios protegidos oficialmente en razón de su catalogación, como bienes de interés cultural, cuando el cumplimiento de las exigencias suponga alterar la configuración de su fachada o su distribución o acabado interior, de modo incompatible con la conservación de dichos edificios”.

El CTE en su parte I considera rehabilitación integral:

Obras que incluyan actuaciones que tengan por objeto de forma simultánea:

- a) la adecuación estructural, considerando como tal las obras que proporcionen al edificio condiciones de seguridad constructiva, de forma que quede garantizada su estabilidad y resistencia mecánica;*
- b) la adecuación funcional, entendiéndose como tal la realización de las obras que proporcionen al edificio mejores condiciones respecto de los requisitos básicos a los que se refiere este CTE. Se consideran, en todo caso, obras para la adecuación funcional de los edificios, las actuaciones que tengan por finalidad la supresión de barreras y la promoción de la accesibilidad, de conformidad con la normativa vigente; o*
- c) la remodelación de un edificio con viviendas que tenga por objeto modificar la superficie destinada a vivienda o modificar el número de éstas, o la remodelación de un edificio sin viviendas que tenga por finalidad crearlas.*

La explicación de la exclusión de las rehabilitaciones parciales en el ámbito de aplicación del DB-HR reside en, como se especificó anteriormente, que el aislamiento acústico entre recintos implica directamente a la totalidad de los elementos constructivos (forjado, tabiquería, cubierta, fachada...), por lo que la intervención debe hacerse sobre el conjunto, como ocurre en la rehabilitación integral. De esta exclusión, razonable desde el punto de vista técnico, nace la problemática de las grandes rehabilitaciones que no alcanzan el carácter de rehabilitación integral y por lo tanto, están exentas del cumplimiento de las exigencias de las DB-HR aunque el coste y la complejidad de las soluciones acústicas a adoptar supondrían un añadido de pequeña entidad en comparación con el total de la actuación.

En resumen, en la actualidad la obra nueva sufre un gran descenso y convive con un cierto auge de la rehabilitación de edificios, que persigue el objetivo de conseguir unas óptimas condiciones de confort similares a las que ofrece un edificio de nueva planta. Pese a que el confort acústico es una de las principales exigencias por parte de los ciudadanos españoles para sus viviendas, la redacción del CTE presenta unas cláusulas demasiado restrictivas para el cumplimiento de las exigencias acústicas en el ámbito de las reformas y rehabilitaciones. A todo esto se suma las soluciones, por el momento, insuficientes en este campo ya que hasta mayo del año 2009 no entra en vigor el DB-HR y los precedentes de rehabilitación acústica resultan escasos.

4.2.1. METODOLOGÍA GENERAL.

Los edificios existentes tienen una serie de factores que aumentan la dificultad de la integración de los estándares de confort acústico respecto a un edificio de nueva planta:

- Respetar el carácter del edificio, limitando al proyectista en el diseño de la reforma.
- Adaptar todas las fases de la intervención a las condiciones existentes.
- Los elementos constructivos existentes pueden resultar imposibles de caracterizar acústicamente por su carácter heterogéneo
- No existen reglas generales ni respuestas comunes para las intervenciones, sino que el análisis se debe realizar para el caso concreto que constituye el edificio existente.

A continuación se describe una posible metodología a seguir en una rehabilitación acústica:

- Localización y caracterización acústica de la fuente.
- Estudio de los aspectos constructivos a considerar.
- Análisis de la posible eliminación o reducción de los niveles sonoros emitidos por la fuente.
- En su caso, diseño del aislamiento de la fuente (encapsulado).
- Diseño del aislamiento adicional para el recinto receptor.

4.2.2. ORIGEN DEL RUIDO.

El primer paso y el más importante para llevar a cabo una rehabilitación acústica es elaborar un diagnóstico real que permita diseñar las medidas correctoras que se puedan aplicar. Esto se consigue por la localización y caracterización de las fuentes de ruido.

4.2.2.1. Ruido procedente del exterior.

Si el ruido proviene del exterior se analizarán las ventanas, fachadas y cubiertas.

Ventanas.

Falta de estanqueidad.

Las ventanas y puertas de terrazas y balcones constituyen el principal punto débil de los edificios antiguos. Con el paso de los años, las uniones de los marcos de la carpintería exterior con el soporte y las uniones del vidrio a la hoja se degradan, con la consiguiente pérdida de estanqueidad de la solución. Una posible solución sería realizar un refuerzo de las juntas de sellado con materiales flexibles y densos.

Más grave resulta el caso de las ventanas de madera que suelen estar curvadas, fruto de los sucesivos ciclos de contracción-expansión provocada por la exposición a la intemperie, haciendo que el cierre de la hoja no se sea estanco. En este caso la única solución viable es la sustitución de la ventana.

Comportamiento acústico de la ventana.

En relación a un comportamiento acústico deficiente de las ventanas se contemplan las siguientes soluciones:

Caja de persiana.

La caja de la persiana es una vía de transmisión de ruido y constituye un problema muy extendido en los edificios que incorporen este tipo de elementos. La solución, siempre que los criterios arquitectónicos lo permitan es colocar la caja de persiana por el exterior o en su defecto un doble vidrio (ver fig. 4.3).

Sustitución del vidrio.

Se plantea esta solución siempre que las características de la carpintería lo permitan y teniendo en cuenta que el comportamiento acústico global de una ventana van ligadas directamente a su comportamiento como sistema, del cual es parte el vidrio. En zonas urbanas, de forma general, es suficiente un vidrio 6/6/8 aunque de no poder la carpintería alojar este espesor se puede optar por soluciones simples como vidrio monolítico o laminado.

Sustitución de la ventana.

La solución contemplada es la sustitución de la ventana, una de las alternativas más extendidas es la superposición sobre la antigua de una ventana tipo monoblock que incorpora integrados marcos, hoja, vidrio y persiana. Tiene el inconveniente de que al colocar el marco de la ventana nueva sobre la antigua las dimensiones del vidrio disminuyen, con la consiguiente reducción de

iluminación. No obstante este aspecto resulta positivo desde el punto de vista acústico.

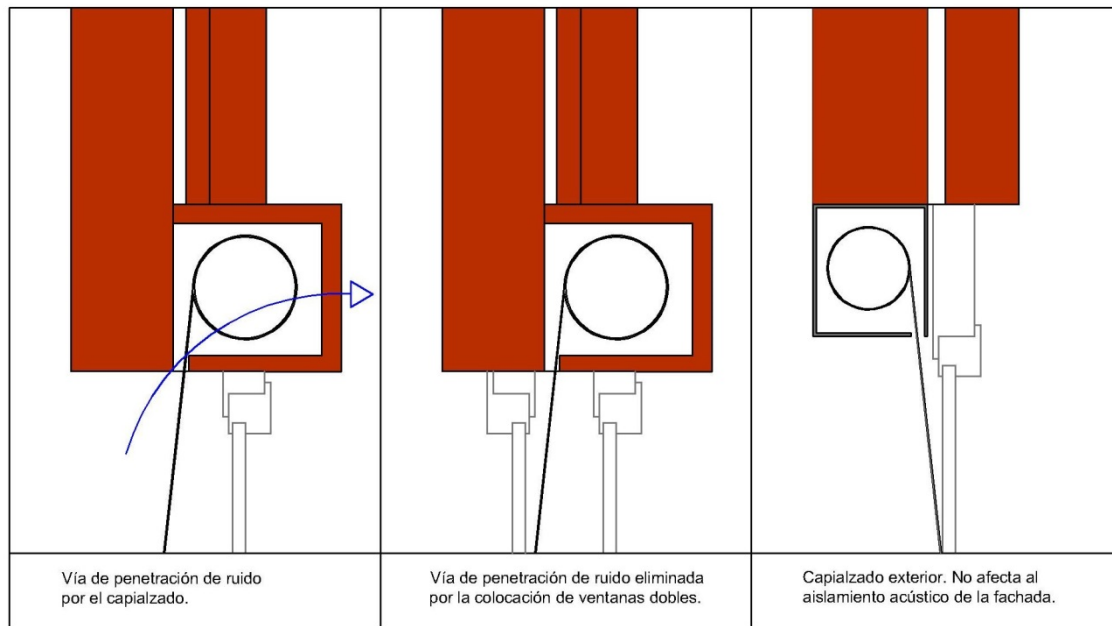


Fig. 4.3. El capialzado como vía de penetración de ruido.

Fachadas y cubierta.

Con la intervención sobre la carpintería exterior se disminuye considerablemente el ruido exterior y el siguiente paso es la actuación sobre fachadas y cubierta. Las entradas de aire existentes en la fachada deben sustituirse por sistemas de ventilación con tratamientos acústicos específicos, reforzando las zonas con peores prestaciones (zonas con espesores inferiores la resto de la fachada o de materiales de peores características) con el fin de unificar las propiedades de la fachada.

Si la estructura del edificio y las dimensiones de las estancias lo permiten, una opción adecuada consiste en trasdosar la fachada con placas de yeso laminado o lana mineral.

En cuanto a la cubierta, debe tratarse colocando un techo suspendido con material absorbente en su cámara diseñada de acuerdo a las características del ruido exterior.

4.2.2.2. Ruido procedente de zonas comunes.

Cuando el ruido provenga de las zonas comunes del edificio, como escaleras o pasillos, el elemento de más influencia a analizar son las puertas separadoras.

Puertas.

Falta de estanqueidad.

La solución es análoga al caso de las ventanas, con la variación del estudio específico de la holgura entre la hoja y el suelo.

Masa de la puerta.

Las puertas de los edificios antiguos suelen tener una masa que resulta insuficiente para el aislamiento acústico por lo que la intervención más obvia consiste en su sustitución por otra de características acústicas adecuadas. Si se quiere conservar la puerta existente existe una alternativa que consiste en colocar en la parte inferior de la puerta una placa de material denso que permite aumentar sus prestaciones acústicas.

4.2.2.3. Ruido procedente de estancias contiguas.

Se supone que entre las dos estancias estudiadas no existen puertas ni ventanas de separación sino que se trata de un caso análogo al de dos viviendas separadas. Se comprobarán el elemento de separación vertical entre ambos recintos y todos los elementos constructivos unidos a él.

Falta de estanqueidad.

Se comprobará la estanqueidad del recinto analizando dos factores:

Encuentros entre elementos constructivos. Se debe comprobar que el encuentro entre elementos constructivos está realizado de forma correcta y que no constituyen puentes acústicos. Se debe analizar también la superficie de los paramentos, de forma que no existan transmisiones laterales. Para ello se realizará un minucioso estudio de puntos débiles acústicos como: cajas de enchufes enfrentadas, paso de tuberías que disminuyan la masa superficial del elemento separador...

Propiedades de los elementos de separación. Si la estanqueidad es correcta y los niveles sonoros siguen siendo elevados, debe estudiarse la composición de los elementos que intervienen en la transmisión directa y laterales del ruido. Una vez identificado el elemento constructivo débil, se procederá a su refuerzo colocando un trasdosado autoportante.

4.2.2.4. Ruido procedente del recinto superior.

La solución se llevará a cabo, principalmente, actuando sobre el elemento de separación horizontal, aunque los procedimientos son diferentes según se pueda actuar sobre el suelo del recinto superior, sobre el techo del recinto inferior o sobre ambos.

Suelo del recinto superior.

La intervención sobre el suelo del recinto superior resulta la actuación más eficaz ya que se atenúa el ruido de impacto en su origen y además se disminuye la transmisión del ruido aéreo. Para ello puede colocarse, en función del problema detectado, desde una moqueta hasta la colocación de suelos flotantes tanto secos como húmedos. La fig. 4.4 muestra una solución para una actuación en el suelo del recinto superior si existe un forjado de madera (1), formada por un mortero aligerado a base de arcilla expandida de espesor 6 cm (2), una lámina flexible de polietileno reticulado (3), mortero autonivelante de espesor 5 cm (4) y el acabado deseado (5).

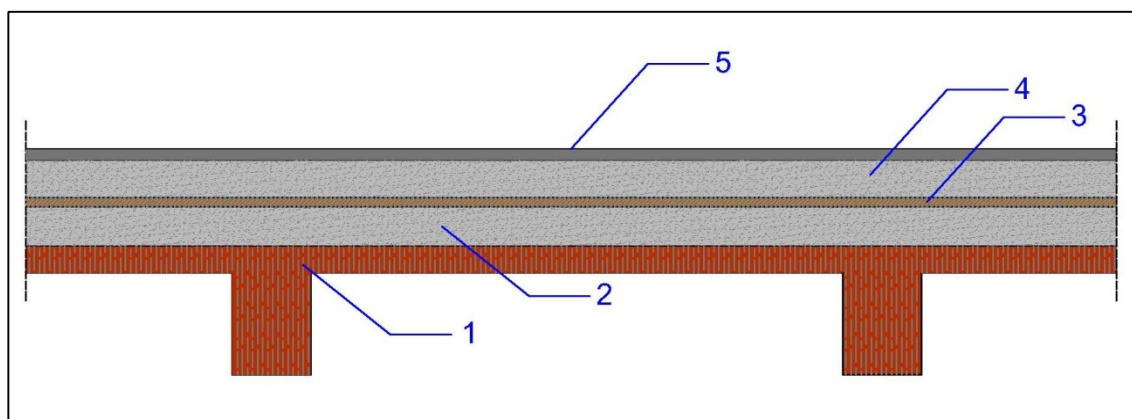


Fig. 4.4. Actuación sobre el suelo en forjado de madera.

Techo del recinto inferior.

Si no se puede actuar en el suelo del recinto superior o es necesario complementar la solución adoptada en el apartado anterior, se puede optar por la solución de un doble techo acústico debidamente dimensionado y ejecutado.

Cuando estas técnicas no son suficientes, deberán tratarse las transmisiones laterales actuando sobre los elementos de separación vertical.

4.2.2.5. Ruido procedente de las instalaciones.

El ruido procedente de las instalaciones supone un problema bastante amplio de tratar dada la cantidad de instalaciones que alberga un edificio. A continuación se expone brevemente alguna solución global aplicable de forma general:

Actuaciones sobre la fuente generadora de ruido.

Bajo esta denominación se encuentran, por ejemplo, las calderas, máquinas de ascensores y extractores de aire. Un aspecto clave es el mantenimiento y limpieza de la maquinaria, a menudo obviado por los propietarios y que suele derivar en averías. El diagnóstico de un técnico puede evaluar las condiciones en la que se encuentra la maquinaria para su posible reparación o sustitución.

En segundo lugar hay que estudiar la ubicación de la maquinaria y su direccionalidad acústica. Si fuese posible, se cambiaría su orientación, para no afectar a recintos sensibles del edificio. Por otra parte y para solucionar el problema de ruido por vibración, si este tipo de fuentes se encuentran apoyadas o fijadas sobre elementos estructurales del edificio, debe procederse a su desolidarización.

Distribución de las instalaciones.

La mayor parte de la red de distribución de instalaciones de un edificio discurre por la mayor parte de este y no siempre resulta ser la más adecuada, pudiendo circular los conductos por estancias sensibles acústicamente. Se analizará la posibilidad de modificar esta distribución centrándola por zonas comunes como pasillos y cocinas y fijarlas a los paramentos de forma flexible para evitar la posible transmisión de vibraciones y de ser el caso, aislar acústicamente los conductos (ver fig. 4.5)

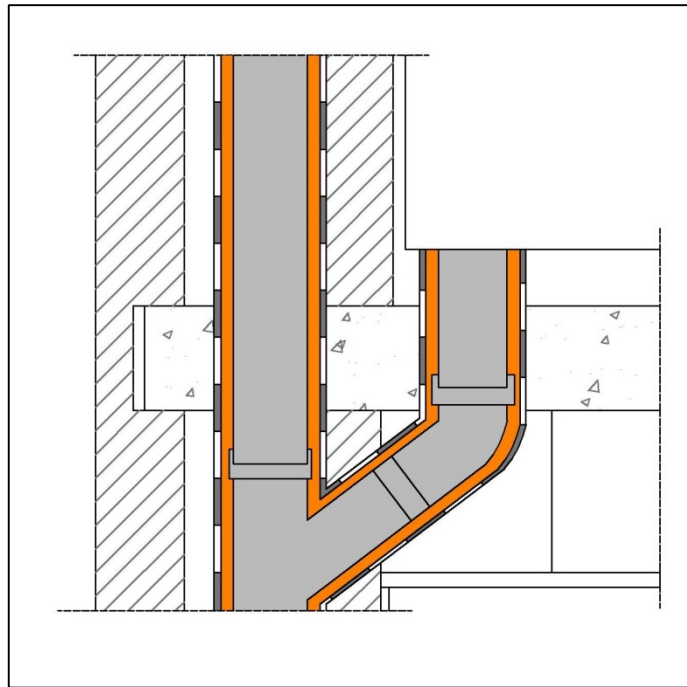


Fig. 4.5. Forrado de bajante.

4.3. DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS SINGULARES.

En el apartado anterior se desarrolló la integración de la calidad acústica en los procesos constructivos incluidos dentro del ámbito de aplicación del marco legislativo español, con el objetivo de cumplir el requisito de habitabilidad de bienestar acústico; quedando fuera del mismo: *los recintos y edificios destinados a espectáculos, tales como auditorios, salas de música, teatros, cines, etc., que serán objeto de estudio especial en cuanto a su diseño, y se considerarán recintos de actividad respecto a los recintos protegidos y a los recintos habitables colindantes.*

El presente apartado expone de forma somera criterios relativos al diseño actual de los mencionados edificios.

4.3.1. ESPACIOS COMUNITARIOS.

4.3.1.1. Objetivos acústicos.

- Garantizar la existencia de confort acústico.
- Asegurar la correcta inteligibilidad de la palabra.
- Si el espacio va a disponer de un sistema de megafonía, asegurar que los mensajes emitidos sean claramente inteligibles y lleguen con un nivel suficiente y sin coloraciones a todos los puntos del recinto.

Con la existencia de confort acústico se garantiza la ausencia de molestias a las personas presentes en el recinto considerado. Esta característica además, es un indicativo de que el grado de inteligibilidad será alto. La obtención de una correcta inteligibilidad de la palabra es de especial importancia en aquellos recintos donde la comprensión del mensaje oral es imprescindible, aunque también es necesaria en espacios de pública concurrencia, al menos entre interlocutores próximos. Se consigue un adecuado confort acústico y una correcta inteligibilidad de la palabra mediante:

- Un ruido de fondo suficientemente bajo.
- Un nivel de campo reverberante bajo.
- Ausencia de ecos y focalizaciones del sonido.

4.3.1.2. Criterios de diseño.

Obtención del tiempo de reverberación deseado.

Una vez fijado el volumen del espacio en cuestión, se definirán las superficies que deberán ser tratadas acústicamente (generalmente son el techo y la parte superior de las paredes) y los materiales absorbentes a utilizar a fin de que el tiempo de reverberación medio en condiciones de ocupación elevado se halle dentro de los objetivos. La fórmula a emplear es la ecuación de Sabine

Eliminación de ecos y focalizaciones del sonido.

Ecos.

Se adoptarán las siguientes soluciones para prevenir o eliminar ecos:

- Colocar material absorbente por delante de las superficies conflictivas. Como norma general, el porcentaje de superficie tratada para evitar esta superficie de anomalías deberá ser inferior al 10% de la superficie total de la sala.

- Dar una forma convexa a las superficies conflictivas.
- Reorientar las superficies conflictivas con el fin de redirigir el sonido reflejado hacia otras zonas.

Ecoss flotantes.

La solución básica para prevenir la aparición de eco flotante consiste en evitar la existencia de paredes reflectantes enfrentadas dándole una pequeña inclinación (alrededor de 5°) a una de las dos paredes. También se puede aplicar un tratamiento absorbente pero resulta menos efectiva que la solución anterior.

Focalizaciones del sonido.

Para la prevención de focalizaciones del sonido se evitarán las formas cóncavas en las paredes del recinto así como los techos en forma de cúpula.

Efecto tambor.

- La ejecución de un pavimento en contacto directo con el forjado para evitar la existencia de cavidades o rellenar la posible cavidad existente entre ambos elementos con un material absorbente atenúa considerablemente el efecto tambor.
- Si se diseña un pavimento de hormigón, se puede cubrir con moqueta de alta densidad, obteniendo una reducción del nivel acústico de 4 dB por debajo del nivel óptimo de referencia.
- La utilización de linóleo supone el mejor resultado ya que la reducción del nivel medio de ruido de impacto es de 7 dB.

Ubicación del sistema de megafonía.

Existen dos planteamientos para la ubicación de los altavoces del sistema de megafonía:

- Altavoces concentrados. Recomendable cuando las condiciones acústicas del espacio son buenas y se han alcanzado los objetivos acústicos planteados en un inicio. Esta distribución permite conseguir una adecuada cobertura al alejar los altavoces del público pero la inteligibilidad de la palabra es menor.
- Altavoces distribuidos. Es beneficioso en condiciones acústicas desfavorables, como en polideportivos, estaciones de tren o aeropuertos. Los altavoces se sitúan en puntos cercanos a las diferentes zonas de público, con el objetivo de aumentar el nivel de campo directo con el consecuente aumento en la inteligibilidad de la palabra. Precisa la

utilización de un número mayor de altavoces que en el caso de sistema concentrado, lo que encarece la instalación.

4.3.2. Teatros.

4.3.2.1. Objetivos acústicos.

El objetivo fundamental que se persigue es conseguir una óptima inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de la sala. En el caso de que la sala sea cerrada también se plantea de forma complementaria otro objetivo consistente en lograr que la sonoridad se halle por encima de un valor mínimo recomendado. El segundo objetivo resulta más difícil de cumplir en la parte posterior de la sala, donde el sonido directo es más débil.

El diseño desempeña un papel secundario en recintos pequeños, donde los objetivos acústicos se consiguen con un tiempo de reverberación adecuado. En salas de tamaño medio o grande, al contrario, además de cumplir lo anterior es imprescindible que el recinto genere el máximo número de primeras reflexiones.

4.3.2.2. Criterios de diseño.

Volumen de la sala y número de asientos.

La relación entre el volumen y el número de asientos del teatro debe hallarse aproximadamente, por la expresión:

$$4 \leq \frac{\text{Volumen del recinto}}{\text{nº de asientos previstos}} \leq 6$$

Se deben reservar, entonces de 4 a 6 m³ por asiento.

Visibilidad del escenario.

Que el sonido directo que llega a cada espectador no sea obstruido por los espectadores que se encuentran delante de él es uno de los objetivos fundamentales en un teatro. Se consigue con un adecuado diseño que permita una buena visibilidad del escenario. Se considera que los ojos se sitúan, como promedio, 10 cm por debajo de la parte más elevada de la cabeza, de tal forma que la inclinación del suelo deberá permitir el paso de la visual por encima de la cabeza del espectador situado en la fila anterior.

En cuanto a la pendiente del anfiteatro se solía situar en torno a los 30° como valor máximo, aunque por razones de accesibilidad y seguridad, este valor varía según la legislación de cada país.

Existencia de primeras reflexiones.

La existencia de primeras reflexiones en la zona de público supone un aumento de la inteligibilidad de la palabra y de la sonoridad. Su generación se consigue mediante un adecuado diseño de superficies reflectoras correctamente orientadas de acuerdo con la acústica geométrica. Las superficies se situarán preferentemente en la parte superior de la sala a modo de falso techo o como paneles suspendidos. De forma adicional, es posible diseñar las partes inferiores de las paredes laterales de forma que produzcan primeras reflexiones hacia el público.

Un criterio complementario a tener en cuenta es la generación de primeras reflexiones en la zona posterior de la sala, donde el sonido directo es más débil. Esto se consigue mediante la utilización de dos tramos de falso techo, o paneles suspendidos con inclinación apropiada. Una manera alternativa de conseguir el efecto deseado es darle inclinación a la pared posterior o bien aprovechar las reflexiones de segundo orden generadas por el techo y la pared.

Balcones y anfiteatros.

Se propone que la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón no debe ser superior a 2,5 veces la altura de la abertura asociada con objeto de evitar una disminución de sonoridad en la zona situada debajo de un anfiteatro o balcón (ver fig. 4.6).

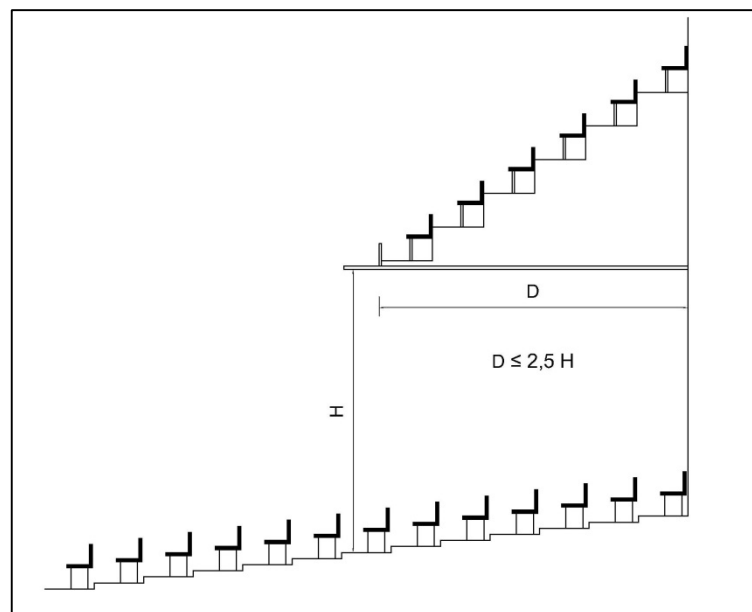


Fig. 4.6. Máxima profundidad de la zona situada debajo de un balcón o anfiteatro

Elección de materiales.

Como criterio general se colocarán materiales absorbentes en las partes superiores de las paredes laterales y sobre la parte posterior del techo o falso

techo. El resto de superficies irán cubiertas con materiales reflectantes. Una correcta elección de materiales es un factor fundamental para la obtención de un adecuado tiempo de reverberación aunque su valor dependerá para cada caso concreto del volumen de la sala. Por otra parte, la alternancia entre materiales absorbentes con elementos resonadores permite evitar que el tiempo de reverberación no aumente a bajas frecuencias

Prevención de la coloración de la voz, ecos y focalizaciones del sonido.

Como criterio general, la coloración de la voz se previene evitando en el diseño las superficies planas de grandes dimensiones. Si por alguna razón esto no fuese posible cabe la posibilidad de darles una cierta convexidad, solución también efectiva para eliminar ecos y focalizaciones del sonido.

Otras soluciones para la prevención o eliminación de ecos y focalizaciones son (ver fig. 4.7):

- Colocación de material absorbente sobre las superficies conflictivas, prestando atención a la posible disminución excesiva del tiempo de reverberación y de la sonoridad.
- Reorientar las superficies conflictivas o incorporar un elemento con una cierta inclinación que permita la redirección del sonido.
- Para evitar el eco flotante se puede actuar como lo expuesto en el apartado de “Espacios comunitarios”

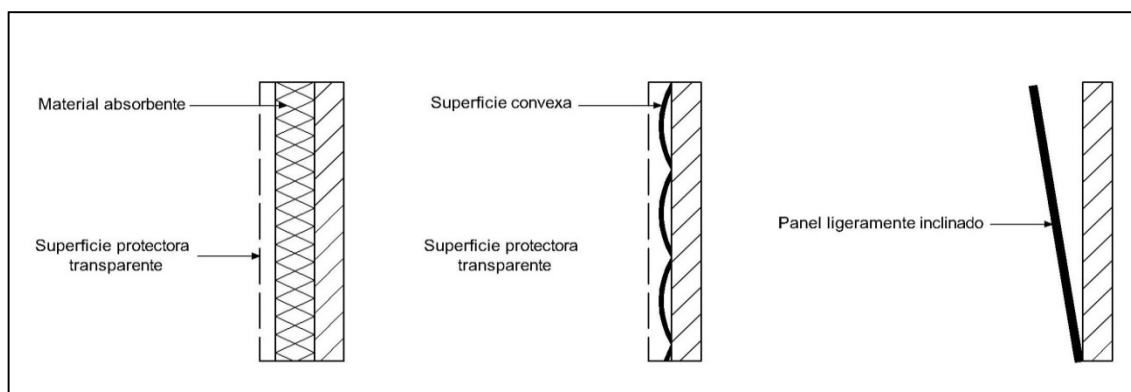


Fig. 4.7. Soluciones para la prevención o eliminación de ecos.

4.3.3. Salas de conciertos.

4.3.3.1. Objetivos acústicos.

El diseño de espacios destinados a la interpretación musical es el de más complejidad desde el punto de vista acústico ya que no existen fórmulas que permitan garantizar, a priori, la calidad acústica del recinto. En las últimas décadas se obtuvieron condiciones acústicas favorables en base a la relación de valoraciones subjetivas con una serie de parámetros físicamente medibles que se corresponden con unos objetivos acústicos prefijados. La obtención de

los valores de referencia se realizó de forma puramente empírica: se analizó un gran número de salas de conciertos de todo el mundo se determinaron los valores de sus parámetros acústicos más representativos. Los valores correspondientes a aquellos recintos considerados unánimemente como excelentes desde un punto de vista acústico han sido los elegidos como patrón para el diseño de nuevas salas.

Hoy en día estos parámetros se calculan en la fase diseño mediante simulación acústica y pueden ser medidos una vez construido el recinto.

4.3.3.2. Criterios de diseño.

Volumen de la sala y número de asientos.

No existe una fórmula que establezca una relación óptima para el volumen de la sala y el número de asientos pero, fruto del estudio de numerosas salas de conciertos con una acústica muy favorable, se recomienda lo siguiente:

- La mayor parte de las salas de conciertos de música sinfónica más prestigiosas del mundo tienen un volumen medio de 20.000 m³ y una capacidad media de 2.300 asientos. Como norma general se debe buscar que la superficie ocupada por el público sea la menor posible para garantizar una sonoridad adecuada.
- Atendiendo a razones de confort, la mayoría de salas construidas desde 1980 la relación entre la superficie ocupada por el público y el número de asientos es de aproximadamente 0,5, es decir, 0,5 m² por asiento.
- Conociendo el aforo de la sala y la superficie ocupada por las sillas y los músicos, se determina el volumen necesario para que el tiempo de reverberación sea el adecuado.

Forma de la sala.

No existe una única solución arquitectónica que garantice una calidad acústica óptima, pese a que las más famosas salas de concierto son de planta rectangular, existen otras formas que proporcionan un resultado similar desde el punto de vista acústico (ver fig. 4.8). Independientemente de la forma de la sala, la solución adoptada debe garantizar la existencia de primeras reflexiones en todos sus puntos con el fin de aumentar la claridad musical, la sonoridad y la sensación de intimidad acústica.

Si además dichas reflexiones son laterales (aquellas que llegan a los oídos de los espectadores con un ángulo entre 35° y 75° respecto al plano vertical que pasa a través suyo y del centro del escenario) se produce una mejora en los atributos anteriores. Tres tipos de diseño garantizan la existencia de primeras reflexiones laterales significativas.

- Sala estrecha de planta rectangular.
- Utilización de paneles reflectantes separados de los laterales de la sala y con cierta inclinación.
- Distribución de los asientos en diferentes niveles, a modo de terrazas con forma trapezoidal.

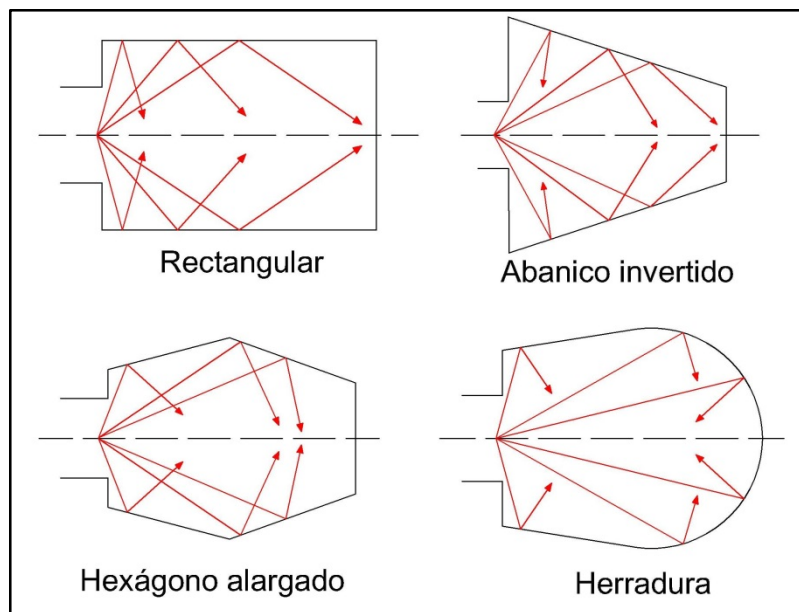


Fig. 4.8. Generación de primeras reflexiones según las diferentes tipologías de salas de conciertos.

Impresión espacial del sonido.

En una sala de conciertos aparte de la existencia de una gran cantidad de primeras reflexiones, como se describió anteriormente, se busca un incremento de difusión del sonido, es decir, que el sonido llegue a los oídos del espectador por un igual desde todas las direcciones. La incorporación de irregularidades en el techo y en las paredes laterales de la sala así como la colocación sobre las mismas de difusores, permiten el mencionado incremento de difusión. En la fig. 4.9 en la parte izquierda se puede apreciar el techo artesonado con entrantes pronunciados y nichos laterales de la Sala Sinfónica de Las Palmas de Gran Canaria (1997). La parte derecha de la misma fig. 4.9 muestra los difusores convexos del techo del Royal Albert Hall incorporados en las modificaciones realizadas en los años 60.

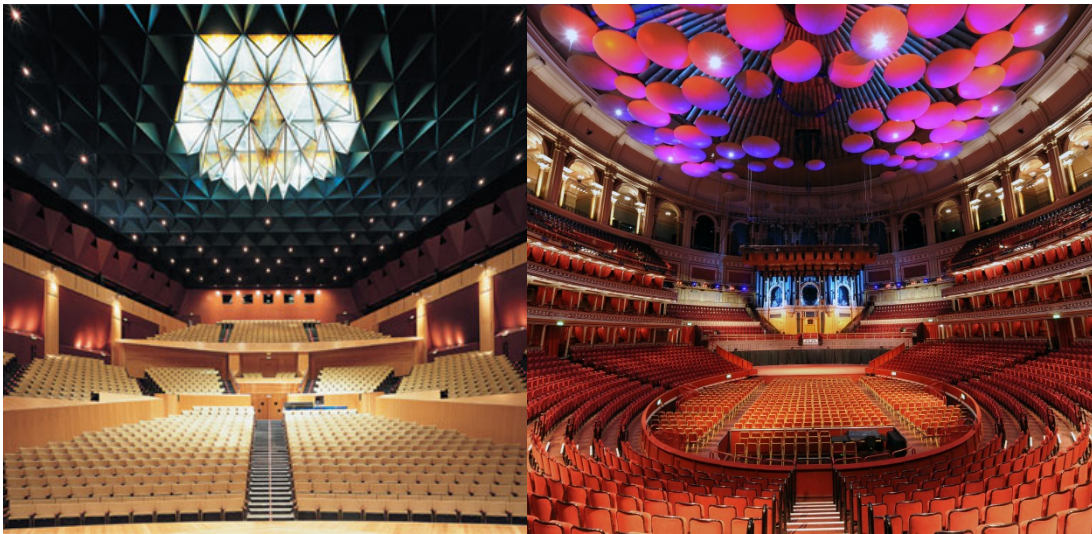


Fig. 4.9. Sala sinfónica de Las Palmas de Gran Canaria (izq.) y el Royal Albert Hall (Londres)(der.)

Visibilidad del escenario, anfiteatros y balcones y prevención de la coloración de la voz, ecos y focalizaciones del sonido.

Son de aplicación los mismos criterios descritos en el apartado de teatros.

Elección de materiales.

Para la construcción de las paredes es recomendable utilizar los siguientes materiales:

- Hormigón macizo.
- Bloques de hormigón pintados o revestidos de yeso.
- Ladrillo revestidos de yeso.

Los materiales utilizados como acabados deben ser acústicamente reflectantes con objeto de evitar una pérdida excesiva de sonidos graves y agudos, lo que supondría a su vez una disminución de calidez acústica. Por ejemplo, el acabado de las paredes y del techo de la sala puede ser a base de madera de grosor superior a 25 mm y densidad media o alta.

Escenario.

En cuanto al diseño del escenario se actúa de forma diferente según exista o no concha acústica. Se llama concha acústica a una cámara desmontable que sirve albergar representaciones sinfónicas y que se instala en el escenario. Está formada por paredes laterales, pared de fondo y techo. Si existe concha acústica, recomienda que su diseño se realice mediante una estructura modular de sencilla instalación. Las paredes laterales tendrán forma de abanico de manera que la pared posterior sea significativamente más estrecha que la abertura. De la misma forma, el techo también será inclinado. Los acabados

interiores serán preferentemente de madera a excepción de la zona posterior de la concha donde se colocarán difusores del sonido.

En el caso de que no exista concha acústica, las paredes situadas alrededor del escenario estarán orientadas de manera que reflejen energía hacia los músicos. En configuraciones con techos elevados, se recomienda colocar un conjunto de reflectores suspendidos del mismo. En cuanto a los materiales, son equivalentes a los utilizados en la sala, con la excepción del suelo donde es conveniente utilizar material reflectante, tipo parquet.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4.

PUBLICACIONES IMPRESAS.

CARRIÓN ISBERT, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1º Edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Francisco Javier; DE LA PUENTE CRESPO, Javier; DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *Guía acústica de la construcción*. 2º Edición. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000. ISBN: 978-84-96437-81-4.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

DOMÍNGUEZ HUERTA, Julián. *Rehabilitación acústica de edificios: Guía de soluciones constructivas y su ejecución para la mejora del aislamiento acústico* [en línea]. AECOR. 2011. Disponible en Internet:
<http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/ponencias/15/Guia_soluciones.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

FLORES PEREITA, Pedro. *Ruido y vibraciones en las instalaciones* [en línea]. Colegio de Arquitectos de Cádiz. 2011. Disponible en Internet:
<http://arquitectosdecadiz.com/uploads/%C3%81reas_Construcci%C3%B3n/16.%20INASEL.%20Casos%20pr%C3%A1cticos.%20Soluciones%20constructivas.%20Pedro%20Flores%20Pereita.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GAMALLO, José Ángel. *Soluciones de rehabilitación acústica de edificios* [en línea]. Danosa. 2011. Disponible en internet:
<http://www.danosarehabilitacion.com/images/PDF/rehabilitacion_acustica_2011.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GÓMEZ MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Buenas prácticas acústicas en la edificación* [en línea]. Universidad de Zaragoza. 2008. Disponible en Internet:
<http://www.arquitectosdecadiz.com/uploads/%C3%81reas_Construcci%C3%B3n/08.%20Buenas%20pr%C3%A1cticas%20ac%C3%BAsticas.%20Francisco%20Javier%20Mart%C3%ADnez.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

INSTITUTO EDUARDO TORROJA. *Guía de aplicación del DB HR Protección frente al ruido*. Versión V.01. 2009. Disponible en Internet:
<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentosadicionales/complementarios/texto_0011.html> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Criterios acústicos en el diseño de centros docentes [en línea]. Disponible en Internet:
<http://www.stee-eilas.org/dok/arloak/lan_osasuna/udakoikas/acust/acus3.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

NORMATIVA.

Parte I. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. 2007.

Documento Básico HR: Protección frente al ruido. Ministerio de Fomento. 2009.

CATÁLOGOS COMERCIALES.

Soluciones con productos multicapa y espumas de PE para la Rehabilitación Acústica. AECOR. Disponible en Internet:

<http://www.codigotecnico.org/web/galerias/archivos/04_Presentacixn_AECOR.pdf>

Soluciones de aislamiento acústico. Andimat. 2009. Disponible en Internet:

<<http://www.andimat.es/wp-content/uploads/soluciones-de-aislamiento-acustico-andimat-jun09.pdf>>

Catálogo de soluciones acústicas y térmicas para la edificación. Asociación de Fabricantes de Lanas Minerales (AFELMA), Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY). 2009. Disponible en Internet:

<http://www.aislar.com/documentos%20enlazados/Nueva_Guia%20Soluciones%20Construcctivas%202012.pdf>

Soluciones de impermeabilización, aislamiento térmico y acústico. Danosa. 2010. Disponible en Internet:

<http://portal.danosa.com/media/descDetalle_DESC_ARCHIVO+desDetalle_88+L1+1.pdf>

Soluciones cerámicas para la rehabilitación acústica. Hispalyt. Consultado en formato físico.

Catálogo de rehabilitación sostenible. URSA Uralita. 2011. Disponible en Internet:

<<http://www.ursa.es/es-es/rehabilitacion/catalogo-de-rehabilitacion-sostenible/paginas/catalogo-de-rehabilitacion-sostenible.aspx>>

CAPÍTULO

5

CASO PRÁCTICO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE UN RECINTO.

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

5.1. MEMORIA.

- 5.1.1. MEMORIA DESCRIPTIVA.
- 5.1.2. MEMORIA CONSTRUCTIVA.
- 5.1.3. MEMORIA DE CÁLCULO.

5.2. MEDICIONES.

5.3. PRESUPUESTO.

5.4. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA.

5.5. CONCLUSIONES.

CAPÍTULO 5. CASO PRÁCTICO DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE UN RECINTO.

En este capítulo se pone en práctica un acondicionamiento acústico de un recinto destinado a uso docente en el que se pretende dotar al mismo de unas condiciones acústicas óptimas.

El desarrollo del capítulo se estructura siguiendo el esquema para proyectos de edificación, eliminando coherentemente aquellos apartados que, por la entidad del ejemplo que se realiza, no resultan adecuados o simplemente son inexistentes. De esta forma, se incluyen las características técnicas de las soluciones y su cumplimiento con la normativa, y las mediciones y el presupuesto para introducir el factor económico como parámetro a tener en cuenta en la elección de las tres posibles soluciones que se proponen. Cabe destacar que las ilustraciones que constituyen el punto final del capítulo se realizaron para representar gráficamente el posible aspecto de las soluciones propuestas, elaborándose los cálculos que verifican el cumplimiento de la normativa en ausencia de mobiliario y sólo se tuvieron en cuenta los revestimientos del recinto.

5.1. MEMORIA.

5.1.1. MEMORIA DESCRIPTIVA.

5.1.1.1. Descripción del proyecto.

Descripción general del recinto.

El recinto que emplazará la sala en cuestión es perfectamente rectangular de dimensiones 12 m x 9 m y la altura entre suelo terminado y techo terminado es de 3 m, lo que conforma un volumen total de 324 m³.

El recinto cuenta con tres ventanas oscilobatientes iguales de dimensiones 1000 x 1250 mm que comunican con el exterior y dos puertas de madera maciza, ambas de dimensiones 825 x 2080 x 35 mm en el paramento opuesto que permiten el acceso al mismo. En el momento del estudio de mejora de calidad acústica los revestimientos de paredes y techo estaban realizados con un enlucido de yeso y el pavimento era de baldosa cerámica.

Programa de necesidades.

El acondicionamiento acústico permite que, gracias a la definición de los revestimientos de las superficies interiores del recinto, las condiciones acústicas sean las adecuadas para el uso al que se pretende destinar.

Uso característico.

Se pretende dar uso docente a la sala, que albergará la impartición de clases y eventos como reuniones o conferencias.

Cumplimiento del CTE.

Documento Básico HR Protección contra el ruido: Es de aplicación en el por el artículo 2, parte I del CTE.

Según el CTE, parte I, capítulo 2, artículo 5 para justificar que el edificio cumple las exigencias básicas se podrá optar por:

a) Adoptar soluciones técnicas basadas en los DB, aplicación en el proyecto, en la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio, es suficiente para acreditar el cumplimiento de las exigencias básicas relacionadas con dichos DB; o

b) Soluciones alternativas, entendidas como aquéllas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.

Se deben cumplir para ello los valores límites del tiempo de reverberación especificados en el apartado 2.2:

1 En conjunto los elementos constructivos, acabados superficiales y revestimientos que delimitan un aula o una sala de conferencias, un comedor y un restaurante, tendrán la absorción acústica suficiente de tal manera que:

a) El tiempo de reverberación en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,7 s.

b) El tiempo de reverberación en aulas y en salas de conferencias vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,5 s.

Descripción básica de los elementos constructivos.

Se proponen tres posibles soluciones para garantizar el confort acústico de la sala. En la solución 1, se opta por un falso techo acústico de altas prestaciones que descuelga 30 cm del techo terminado. El pavimento se sustituye por uno a base de terrazo por razones de uso y ocupación. Los paramentos laterales se mantienen con el enlucido de yeso inicial.

La solución 2 consta de un falso techo de características acústicas inferiores al de la solución 1 que descuelga igualmente 30 cm. Los paramentos laterales se trasdosan con placas de yeso laminado y el pavimento es análogo a la solución anterior.

La solución 3 carece de falso techo y permite mantener el volumen inicial del recinto. El techo va simplemente enlucido y las paredes laterales irán revestidas con madera contrachapada. Para el paramento frontal se opta por tableros acústicos y la pared del fondo se cubrirá con una cortina acústica. En consonancia con la utilización y acabados en madera, se instalará tarima flotante de madera en el pavimento.

5.1.2. MEMORIA CONSTRUCTIVA.

Para la realización del siguiente apartado y los consiguientes presupuestos se han consultado diversas casas comerciales, vía telefónica o correo electrónico e igualmente se han concertado citas con proveedores locales y técnicos profesionales del sector. En la memoria constructiva que se describe a continuación para las diferentes soluciones se incluyen datos de interés de las características acústicas de los elementos constructivos cuya inclusión en el proyecto viene motivada por razones exclusivamente de mejora acústica. Dicha información figura en los catálogos consultados de las diferentes casas comerciales.

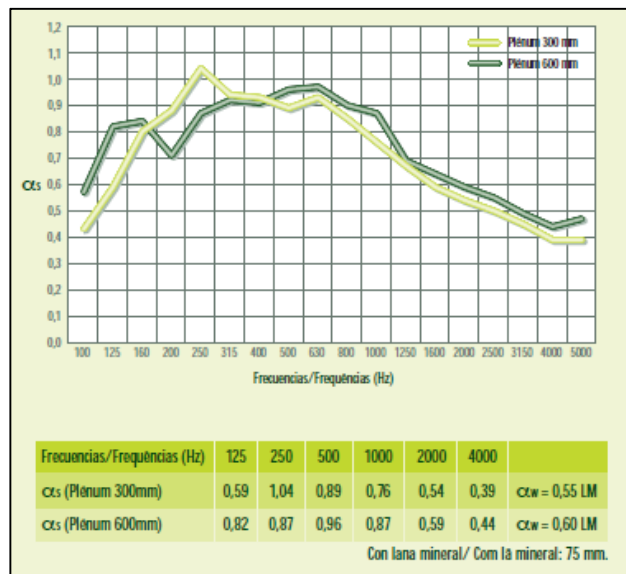
5.1.2.1. Sistema de acabados.

Revestimientos.

Solución 1.

Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BC (borde cuadrado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyado sobre estructura de T-60 modulada cada 600 mm y debidamente suspendidos del forjado por medio de "horquillas" especiales y varilla roscada Ø 6 mm. Coeficiente de absorción acústica contenido en el catálogo comercial de: PLADUR® - YESOS IBÉRICOS, S.A.

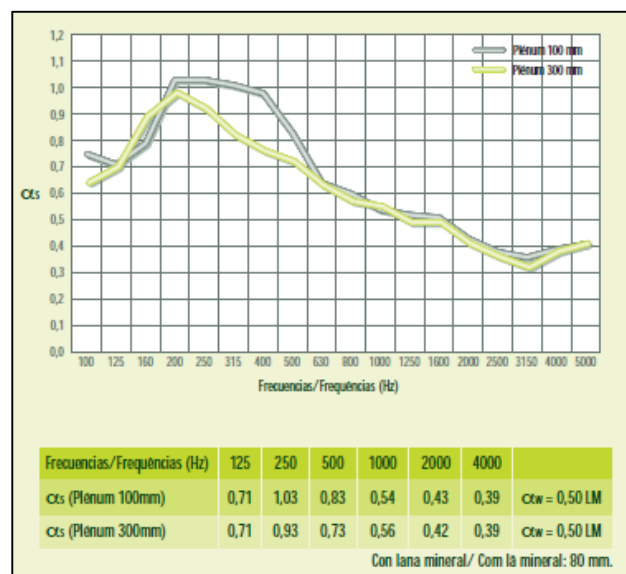
Gráfica coeficiente de absorción acústica del falso techo FON R8/12/50.
 Información facilitada por: PLADUR® - YESOS IBÉRICOS, S.A.



Solución 2.

- Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BA (borde afinado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyados en los perfiles de ANGULAR "L" A-30-TC fijados mecánicamente en todo el perímetro. Coeficiente de absorción acústica contenido en el catálogo comercial de: PLADUR® - YESOS IBÉRICOS, S.A.

Gráfica coeficientes de absorción acústica falso techo FON R15 nº18.
 Información facilitada por: PLADUR® - YESOS IBÉRICOS, S.A.

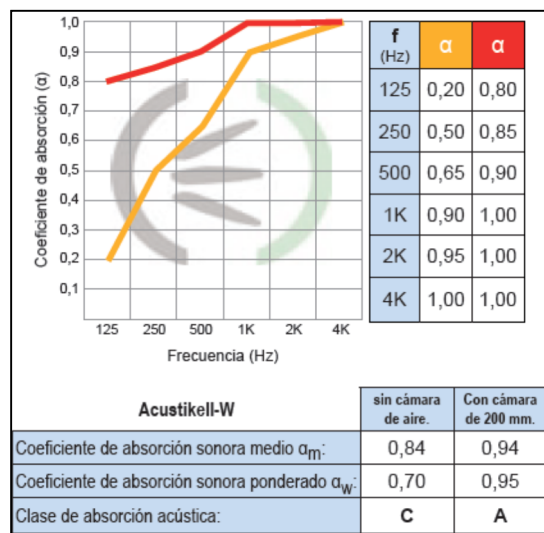


- Trasdosado semidirecto sobre maestras, de placas de yeso laminado, 65 mm de espesor total y separación entre maestras 600 mm. Coeficiente de absorción acústica contenido en el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación.

Solución 3.

- Enlucido de yeso de aplicación en capa fina C6, en una superficie previamente guarnecida, sobre paramento horizontal. Coeficiente de absorción acústica contenido en el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación.
- Revestimiento con tablero contrachapado fenólico de 10 mm de espesor, con la cara vista revestida con chapa de madera de sapeli, adherido al paramento vertical mediante adhesivo de caucho. Coeficiente de absorción acústica contenido en el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación.
- Cortina acústica formada por tela acústica ignífuga colocada sobre riel con ganchos metálicos cada 15 cm. Coeficiente de absorción acústica contenido en el catálogo comercial de Mopra S.L.
- Tablero preformado de fibra de vidrio absorbente y difusor de dimensiones 1195 x 595 x 60 mm. Coeficiente de absorción acústica proporcionado por el catálogo comercial de Acústica Integral.

Gráfica coeficientes de absorción acústica panel Akustikell-V. Información facilitada por: Acústica Integral.



*Resumen ensayo de absorción acústica cortina acústica Morpacur Boheme.
 Información facilitada por: Morpa, S. L*

F (Hz)	T ₁	T ₂	α _s	α _{pi}	α _w	F (Hz)	T ₁	T ₂	α _s	α _{pi}	α _w
100	20,24	17,62	0,02			100	20,24	14,95	0,05		
125	18,43	11,63	0,09	0,10		125	18,42	10,41	0,11	0,15	
160	14,90	8,11	0,15			160	15,06	6,91	0,21		
200	12,07	5,23	0,30			200	12,12	3,79	0,50		
250	11,07	3,99	0,44	0,45		250	11,06	3,14	0,63	0,65	
315	9,82	3,25	0,56			315	9,74	2,40	0,86		
400	8,10	2,80	0,64			400	8,06	2,10	0,97		
500	8,52	2,85	0,64	0,65	0,65 (H)	500	8,45	2,04	1,02	1,00	0,95
630	8,09	2,81	0,64		Clase "C"	630	8,08	1,96	1,06		Clase "a"
800	7,62	2,83	0,61			800	7,65	1,96	1,04		
1000	7,01	2,66	0,64	0,65		1000	7,00	1,95	1,02	1,00	
1250	6,02	2,46	0,66			1250	6,12	1,92	0,98		
1600	5,43	2,29	0,69			1600	5,46	1,84	0,99		
2000	4,79	2,13	0,72	0,70		2000	4,77	1,77	0,98	1,00	
2500	4,28	1,98	0,74			2500	4,27	1,68	0,99		
3150	3,63	1,81	0,76			3150	3,60	1,55	1,01		
4000	2,98	1,61	0,78	0,80		4000	2,96	1,38	1,06	1,00	
5000	2,36	1,36	0,86			5000	2,35	1,22	1,08		

Según norma ISO 354, ISO 11654

Resumen

T1 = Tiempo de reverberación espacio vacío.
 T2= Tiempo de reverberación con cortina.
 αs = Coeficiente de absorción real.
 αpi = Absorción ponderada.
 αw= Reducción de la reverberación.

Cuadro de la izquierda ensayo con tejido liso a 15 cm de la pared.
 Cuadro de la derecha, ensayo con tejido fruncido a 15 cm de la pared.

Pavimentos

Solución 1 y Solución 2.

Solado de baldosas de terrazo de uso intensivo para interiores, 40 x 40 cm, color gris, colocadas a golpe de maceta sobre lecho de mortero de cemento M-5, con arena de miga y rejuntadas con lechada de cemento blanco BL-V 22,5 coloreada con la misma tonalidad de las baldosas.

Coeficiente de absorción acústica contenido en el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación.

Solución 2.

Pavimento de entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70 x 22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de pino de 50 x 25 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm

Coeficiente de absorción acústica contenido en el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación.

5.1.3. MEMORIA DE CÁLCULO.

Estado previo.

Tipo de recinto:		Sala multiusos: teledocencia, formación,reuniones..					Volumen, V (m³):	324
Elemento	Acabado	Área, S (m²)	Coeficiente de absorción acústica medio, α_m				Absorción acústica (m²) $\alpha_m \cdot S$	
			500	1000	2000	α_m		
Suelo	Baldosa cerámica	108	0,01	0,02	0,02	0,02	2,16	
Techo	Enlucido de yeso	108	0,01	0,01	0,02	0,01	1,08	
Paramentos	Enlucido de yeso	118,81	0,01	0,02	0,02	0,01	1,19	
	Puerta de madera	3,44	0,08	0,08	0,08	0,08	0,28	
	Ventanas	3,75	0,05	0,04	0,03	0,04	0,15	
Objetos	Tipo	Uds, N	Área de absorción acústica equivalente media $\alpha_{0,m}$				$\alpha_{0,m} \cdot N$	
			500	1000	2000	α_m		
			Coeficiente de atenuación del aire \bar{m}_m (m ⁻¹)				4 · \bar{m}_m · V	
Absorción aire			500	1000	2000	α_m		
			0,003	0,005	0,01	0,006	7,776	
Absorción acústica del recinto resultante, A (m²)			$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} + \sum_{j=1}^n \alpha_{0,m,j} + 4 \cdot \bar{m}_m \cdot V$				12,63	
Tiempo de reverberación resultante, T (s)			$T = \frac{0,16 V}{A}$				4,10	
Absorción acústica resultante			Absorción acústica exigida					
A(m²)			12,63	≥		64,8		
Tiempo de reverberación resultante			Tiempo de reverberación exigido					
T(s)			4,10	≤		0,7		
CUMPLE CON LAS EXIGENCIAS DEL DB-HR							NO	

Solución 1.

Tipo de recinto:		Sala multiusos: teledocencia, formación, reuniones...				Volumen, V (m ³)		291,6
Elemento	Acabado	Área, S (m ²)	Coeficiente de absorción acústica medio, α_m				Absorción acústica (m ²) $\alpha_m \cdot S$	
			500	1000	2000	α_m		
Suelo	Terrazo	108,00	0,01	0,02	0,02	0,02	2,16	
Techo	Falso Techo	108,00	0,89	0,76	0,54	0,73	78,84	
Paramentos	Enlucido de yeso	57,61	0,01	0,01	0,02	0,01	0,58	
	Puerta de madera	3,44	0,08	0,08	0,08	0,08	0,28	
	Ventanas	3,75	0,05	0,04	0,03	0,04	0,15	
Objetos	Tipo	Uds, N	Área de absorción acústica equivalente media $\alpha_{0, m}$				$\alpha_{0, m} \cdot N$	
			500	1000	2000	α_m		
Absorción aire		Coeficiente de atenuación del aire \bar{m}_m (m ⁻¹)				$4 \cdot \bar{m}_m \cdot V$		
Absorción acústica del recinto resultante, A (m ²)		$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} + \sum_{j=1}^n \alpha_{0, m,j} + 4 \cdot \bar{m}_m \cdot V$				89,00		
Tiempo de reverberación resultante, T (s)		$T = \frac{0,16 V}{A}$				0,52		
Absorción acústica resultante				Absorción acústica exigida				
A(m ²)		89,00		≥		58,32		
Tiempo de reverberación resultante				Tiempo de reverberación exigido				
T(s)		0,52		≤		0,7		
CUMPLE CON LAS EXIGENCIAS DEL DB-HR							SI	

Solución 2.

Tipo de recinto:		Sala multiusos: teledocencia, formación, reuniones...					Volumen, V (m³):	291,6
Elemento	Acabado	Área, S (m²)	Coeficiente de absorción acústica medio, α_m				Absorción acústica (m²) $\alpha_m \cdot S$	
			500	1000	2000	α_m		
Suelo	Terrazo	108,00	0,01	0,02	0,02	0,02	2,16	
Techo	Falso Techo	108,00	0,73	0,56	0,42	0,57	61,56	
Paramentos	Paneles Pladur	106,21	0,05	0,09	0,07	0,06	6,37	
	Puerta de madera	3,44	0,08	0,08	0,08	0,08	0,28	
	Ventanas	3,75	0,05	0,04	0,03	0,04	0,15	
Objetos	Tipo	Uds, N	Área de absorción acústica equivalente media $\alpha_{0, m}$				$\alpha_{0, m} \cdot N$	
			500	1000	2000	α_m		
Absorción aire			Coeficiente de atenuación del aire \bar{m}_m (m ⁻¹)				4 · \bar{m}_m · V	
			500	1000	2000	α_m		
			0,003	0,005	0,01	0,006	6,9984	
Absorción acústica del recinto resultante, A (m²)			$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} + \sum_{j=1}^n \alpha_{0,m,j} + 4 \cdot \bar{m}_m \cdot V$				77,52	
Tiempo de reverberación resultante, T (s)			$T = \frac{0,16 V}{A}$				0,60	
Absorción acústica resultante			Absorción acústica exigida					
	A(m²)	77,52	≥		58,32			
Tiempo de reverberación resultante			Tiempo de reverberación exigido					
	T(s)	0,60	≤		0,7			
CUMPLE CON LAS EXIGENCIAS DEL DB-HR							SI	

Solución 3.

Tipo de recinto:		Sala multiusos: teledocencia, formación, reuniones...					Volumen, V (m³):	324
Elemento	Acabado	Área, S (m²)	Coeficiente de absorción acústica medio, α_m				Absorción acústica (m²) $\alpha_m \cdot S$	
			500	1000	2000	α_m		
Suelo	Tarima de madera	108,00	0,08	0,09	0,10	0,09	9,72	
Techo	Enlucido de yeso	108,00	0,01	0,01	0,02	0,01	1,08	
Paramentos	Madera contrachapada	64,81	0,17	0,09	0,10	0,13	8,43	
	Tablero acústico	27,00	0,85	0,80	0,90	0,84	22,68	
	Cortina acústica	27,00	0,90	0,90	0,90	0,90	24,30	
	Puerta de madera	3,44	0,08	0,08	0,08	0,08	0,28	
	Ventanas	3,75	0,05	0,04	0,03	0,04	0,15	
Objetos	Tipo	Uds, N	Área de absorción acústica equivalente media $\alpha_{0,m}$				$\alpha_{0,m} \cdot N$	
			500	1000	2000	α_m		
Absorción aire			Coeficiente de atenuación del aire $\overline{m_m}$ (m ⁻¹)				4 · $\overline{m_m}$ · V	
			500	1000	2000	α_m		
			0,003	0,005	0,01	0,006		7,776
Absorción acústica del recinto resultante, A (m²)			A = $\sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} + \sum_{j=1}^n \alpha_{0,m,j} + 4 \cdot \overline{m_m} \cdot V$				74,41	
Tiempo de reverberación resultante, T (s)			$T = \frac{0,16 V}{A}$				0,70	
Absorción acústica resultante			Absorción acústica exigida					
A(m²)			73,98	≥	64,8			
Tiempo de reverberación resultante			Tiempo de reverberación exigido					
T(s)			0,697	≤	0,70			
CUMPLE CON LAS EXIGENCIAS DEL DB-HR							SI	

5.2. MEDICIONES.

Solución 1.

RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
---------	-----	----------	---------	--------	-----------	----------

m² falso techo acústico.

Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BC (borde cuadrado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyado sobre estructura de T-60 modulada cada 600 mm y debidamente suspendidos del forjado por medio de "horquillas" especiales y varilla roscada Ø 6 mm. Incluso arte proporcional de anclajes, suspensiones, cuelgues, tornillería, juntas estancas /acústicas de su perímetro y pasta de juntas sin cinta PREGYLYS 95 SB, etc. Montaje según Normativa Intersectorial de ATEDY: "Sistemas de techos continuos con estructura metálica. ATEDY 3" y requisitos del CTE-DB HR.

1	12,00	9,00	108,00	
				108,00

m² solado terrazo.

Solado de baldosas de terrazo de uso intensivo para interiores, 40 x 40 cm, color gris, colocadas a golpe de maceta sobre lecho de mortero de cemento M-5, con arena de miga y rejuntadas con lechada de cemento blanco BL-V 22,5 coloreada con la misma tonalidad de las baldosas, incluso parte proporcional de remates y encuentros.

1	12,00	9,00	108,00	
				108,00

Solución 2.

RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
m² falso techo acústico.						
Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BA(borde afinado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyados en los perfiles de ANGULAR "L" A-30-TC fijados mecánicamente en todo el perímetro. Incluso parte proporcional de anclajes, suspensiones, cuelgues, tornillería, juntas estancas /acústicas de su perímetro, cintas y pasta de juntas, etc. Montaje según Normativa Intersectorial de ATEDY: "Sistemas de techos continuos con estructura metalica. ATEDY 3" y requisitos del CTE-DB HR.						
	1	12,00	9,00		108,00	
						108,00
m² trasdosado yeso laminado.						
Trasdosado semidirecto sobre maestras, de placas de yeso laminado, 65 mm de espesor total y separación entre maestras 600 mm, incluso replanteo, preparación, corte y colocación de las placas, nivelación y aplomado, formación de premarcos, acabado de juntas, parte proporcional de roturas y accesorios de fijación y limpieza.						
	2	12,00		2,70	64,80	
	2	9,00		2,70	48,60	
A deducir:						
Puerta	-2		0,825	2,08	-3,44	
Ventana	-3		1,05	1,25	-3,75	
						106,21
m² solado terrazo.						
Solado de baldosas de terrazo de uso intensivo para interiores, 40 x 40 cm, color gris, colocadas a golpe de maceta sobre lecho de mortero de cemento M-5, con arena de miga y rejuntadas con lechada de cemento blanco BL-V 22,5 coloreada con la misma tonalidad de las baldosas, incluso parte proporcional de remates y encuentros.						
	1	12,00	9,00		108,00	
						108,00

Solución 3.

RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
m² enlucido yeso techo.						
Enlucido de yeso de aplicación en capa fina C6, en una superficie previamente guarnecida, sobre paramento horizontal. Incluso parte proporcional de remates con rodapié, y montaje, desmontaje y retirada de andamios.						
	1	12,00	9,00		108,00	
						108,00
m² tablero contrachapado.						
Revestimiento con tablero contrachapado fenólico de 10 mm de espesor, con la cara vista revestida con chapa de madera de sapeli, adherido al paramento vertical mediante adhesivo de caucho. Incluso parte proporcional de preparación y limpieza de la superficie, formación de encuentros, cortes del material y remates perimetrales.						
	2	12,00	3,00		72,00	
A deducir:						
Puerta	-2		0,825	2,08	-3,44	
Ventana	-3		1,05	1,25	-3,75	
						64,81

m² tablero acústico.

Tablero preformado de fibra de vidrio absorbente y difusor de dimensiones 1195 x 595 x 60 mm. Incluso parte proporcional de preparación y limpieza de la superficie, formación de encuentros, cortes del material y remates perimetrales.

1	9,00	3,00	27,00
			27,00

Ud. Cortina acústica.

Cortina acústica formada por tela acústica ignífuga colocada sobre riel con ganchos metálicos cada 15 cm. Incluso parte proporcional de accesorios y colocación.

1			1
			1

m² tarima flotante.

Pavimento de entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70 x 22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de pino de 50 x 25 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm. Incluso parte proporcional de rodapié del mismo material, juntas, molduras y colocación.

1	9,00	12,00	108,00
			108,00

5.3. PRESUPUESTO.

Solución 1.

RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
---------	----------	--------	---------

CAPÍTULO 1. REVESTIMIENTOS.

m² falso techo acústico.

Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BC (borde cuadrado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyado sobre estructura de T-60 modulada cada 600 mm y debidamente suspendidos del forjado por medio de "horquillas" especiales y varilla roscada Ø 6 mm. Incluso arte proporcional de anclajes, suspensiones, cuelgues, tornillería, juntas estancas /acústicas de su perímetro y pasta de juntas sin cinta PREGYLYS 95 SB, etc. Montaje según Normativa Intersectorial de ATEDY: "Sistemas de techos continuos con estructura metálica. ATEDY 3" y requisitos del CTE-DB HR.

	108,00	63,40	6955,20
--	--------	-------	---------

m² solado terrazo.

Solado de baldosas de terrazo de uso intensivo para interiores, 40 x 40 cm, color gris, colocadas a golpe de maceta sobre lecho de mortero de cemento M-5, con arena de miga y rejuntadas con lechada de cemento blanco BL-V 22,5 coloreada con la misma tonalidad de las baldosas, incluso parte proporcional de remates y encuentros.

	108,00	14,51	1567,08
--	--------	-------	---------

TOTAL CAPÍTULO 1.....			8522,28 €
------------------------------	--	--	------------------

Solución 2.

RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 1. REVESTIMIENTOS.			
m² falso techo acústico.			
Falso techo registrable formado por placas PLADUR® tipo FON BA(borde afinado) de 13 mm de espesor y dimensiones 595x595 mm con perforación pasante y velo negro de 0,27 mm de espesor apoyados en los perfiles de ANGULAR "L" A-30-TC fijados mecánicamente en todo el perímetro. Incluso parte proporcional de anclajes, suspensiones, cuelgues, tornillería, juntas estancas /acústicas de su perímetro, cintas y pasta de juntas, etc. Montaje según Normativa Intersectorial de ATEDY: "Sistemas de techos continuos con estructura metálica. ATEDY 3" y requisitos del CTE-DB HR.	108,00	46,80	5054,44
m² trasdosado yeso laminado.			
Trasdosado semidirecto sobre maestras, de placas de yeso laminado, 65 mm de espesor total y separación entre maestras 600 mm, incluso replanteo, preparación, corte y colocación de las placas, nivelación y aplomado, formación de premarcos, acabado de juntas, parte proporcional de roturas y accesorios de fijación y limpieza.	106,21	16,58	1760,18
m² solado terrazo.			
Solado de baldosas de terrazo de uso intensivo para interiores, 40 x 40 cm, color gris, colocadas a golpe de maceta sobre lecho de mortero de cemento M-5, con arena de miga y rejuntadas con lechada de cemento blanco BL-V 22,5 coloreada con la misma tonalidad de las baldosas, incluso parte proporcional de remates y encuentros.	108,00	14,51	1567,08
TOTAL CAPÍTULO 1.....			8382,48 €

Solución 3.

RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 1. REVESTIMIENTOS.			
m² enlucido yeso techo.			
Enlucido de yeso de aplicación en capa fina C6, en una superficie previamente guarnecida, sobre paramento horizontal. Incluso parte proporcional de remates con rodapié, y montaje, desmontaje y retirada de andamios.	108,00	1,58	170,64
m² tablero contrachapado.			
Revestimiento con tablero contrachapado fenólico de 10 mm de espesor, con la cara vista revestida con chapa de madera de sapeli, adherido al paramento vertical mediante adhesivo de caucho. Incluso parte proporcional de preparación y limpieza de la superficie, formación de encuentros, cortes del material y remates perimetrales.	64,68	39,60	2561,33

m² tablero acústico.

Tablero preformado de fibra de vidrio absorbente y difusor de dimensiones 1195 x 595 x 60 mm. Incluso parte proporcional de preparación y limpieza de la superficie, formación de encuentros, cortes del material y remates perimetrales.

27 52,20 1409,40

Ud. Cortina acústica.

Cortina acústica formada por tela acústica ignífuga colocada sobre riel con ganchos metálicos cada 15 cm. Incluso parte proporcional de accesorios y colocación.

1 135,00 135,00

m² tarima flotante.

Pavimento de entarimado tradicional de tablas de madera maciza de pino gallego de 70 x 22 mm, colocado a rompejuntas sobre rastreles de madera de pino de 50 x 25 cm, fijados mecánicamente al soporte cada 25 cm. Incluso parte proporcional de rodapié del mismo material, juntas, molduras y colocación.

108,00 38,30 4136,64

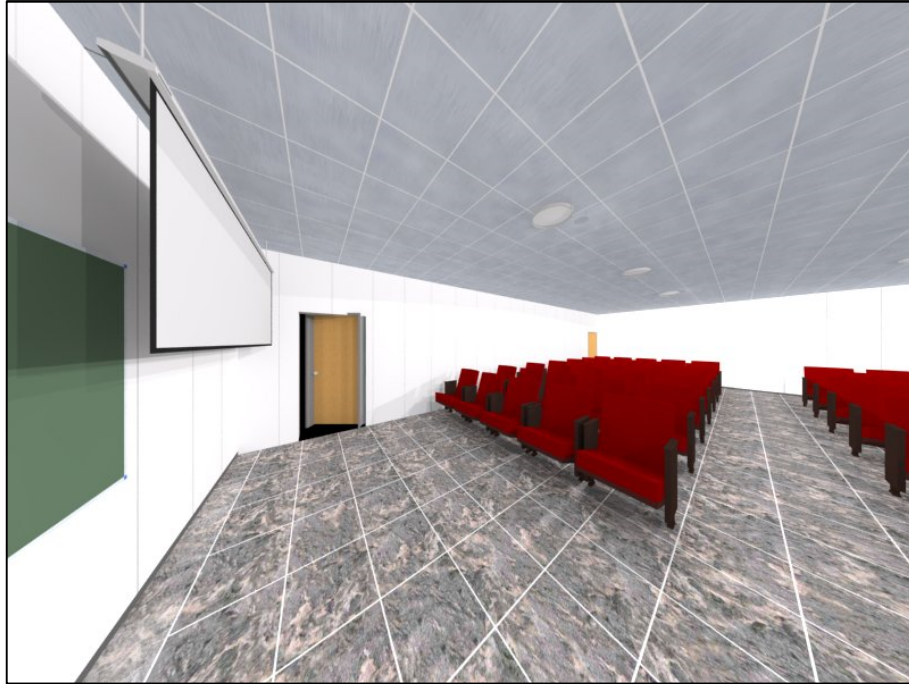
TOTAL CAPÍTULO 1..... 8412,77 €

5.4. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA.

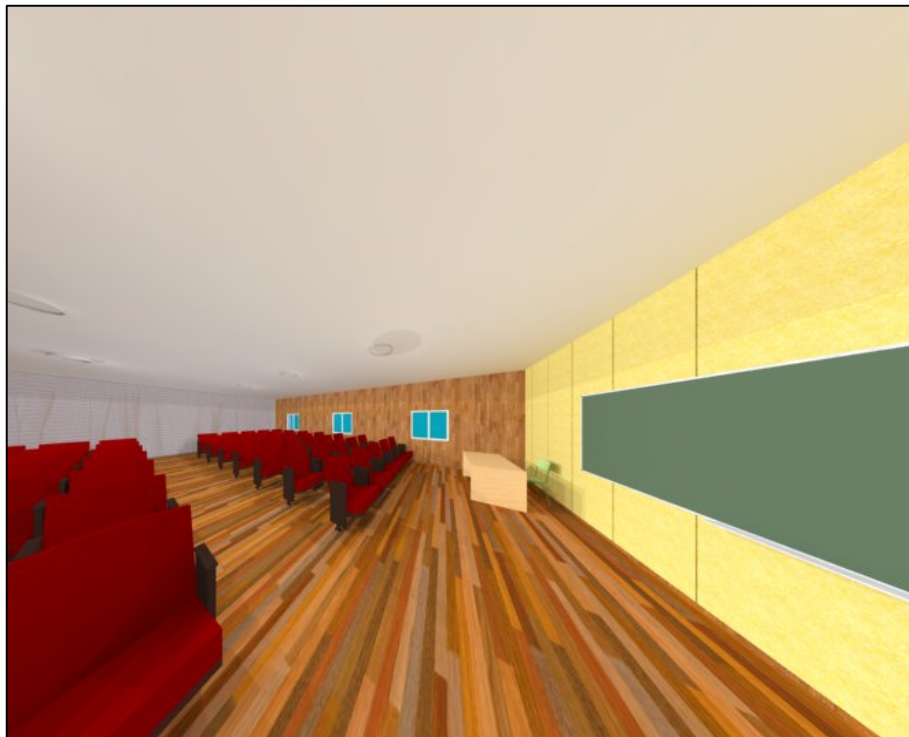
Con el fin de ilustrar de forma visual el aspecto de dos de las posibles soluciones propuestas, se realiza una recreación virtual de las mismas.

Solución 2.





Solución 3.





BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5.

PUBLICACIONES IMPRESAS.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Francisco Javier; DE LA PUENTE CRESPO, Javier; DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *Guía acústica de la construcción*. 2º Edición. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000. ISBN: 978-84-96437-81-4.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

INSTITUTO EDUARDO TORROJA. *Guía de aplicación del DB HR Protección frente al ruido*. Versión V.01. 2009. Disponible en Internet: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentosadicionales/complementarios/texto_0011.html> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

NORMATIVA.

Parte I. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. 2007.

Documento Básico HR: Protección frente al ruido. Ministerio de Fomento. 2009.

CATÁLOGOS COMERCIALES.

Acústica Integral. Guía de materiales y soluciones acústicas. 2013. Disponible en internet:

<http://www.acusticaintegral.com/catalogos_acustica.html>

Morpa. Catálogo de productos Morpa. 2013. Disponible en Internet;

<<http://www.morpa.es/>>

Pladur Yesos Ibéricos. Sistemas Pladur. 2012. Disponible en Internet:

<<http://www.pladur.com/es-es/arquitectos/documentacion-tecnica/DocumentosTecnicos/Documento-Sistemas-Pladur.pdf>>

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

En este capítulo final del Trabajo Fin de Grado se exponen una serie de conclusiones que se desprenden de lo que se ha ido desarrollando a lo largo del mismo.

Tanto autores como técnicos profesionales en la materia convergen en que la acústica es una de las ciencias clásicas más jóvenes, como se menciona en el Capítulo 1. La primera referencia escrita donde se establece un nexo entre acústica y arquitectura data del siglo I a.C. y corresponde al romano Vitrubio. En ese siglo también se construye el Teatro de Epidauro, símbolo de los teatros griegos y que contaba con unas características acústicas óptimas para una edificación de tal envergadura. Sin embargo, no es hasta finales del siglo XIX cuando la acústica dejó de ser una ciencia de carácter inexacto gracias a la obra de Lord Rayleigh, cuyo tratado sobre acústica contenía los fundamentos físicos de esta ciencia y aún hoy en día sirve como referencia. No menos importante fue W.C Sabine, autor de la expresión matemática del tiempo de reverberación que lleva su nombre utilizada universalmente hasta nuestros días.

En todas las épocas se construyeron recintos, como teatros, iglesias o auditorios de condiciones acústicas dispares. A veces, las corrientes arquitectónicas de la época, o la grandiosidad del monumento superaban al objetivo final de tener una acústica aceptable. En otras ocasiones, el éxito de los diseños era fruto de una combinación entre suerte, intuición y experiencia y muchos diseños se reproducían fielmente pero con resultados muy lejos de ser los deseados. No obstante, los arquitectos eran conscientes de las necesidades acústicas de las edificaciones aunque ciertos parámetros no estuviesen definidos con exactitud y a lo largo de la historia vemos, por ejemplo, reducciones de los volúmenes de iglesias o teatros para disminuir el tiempo de reverberación.

A partir de 1930, la acústica se consolida como nueva ciencia gracias a la evolución de los instrumentos electrónicos de medición que posibilitaban relacionar los parámetros subjetivos ligados al sonido con una serie de parámetros objetivos obtenidos in situ. Resulta evidente el importante salto cualitativo que supuso la aparición de mediciones objetivas en un campo donde esta labor la realizaba el único sistema que se conocía hasta entonces: el oído humano.

En relación con esto último, en el Capítulo 2 se realiza un compendio de los fundamentos científicos de la Acústica así como de los descriptores acústicos más utilizados y de los instrumentos de medición acústica utilizados en la edificación. El conocimiento del comportamiento del sonido y de los sistemas constructivos conforma el punto de partida para la consecución de los objetivos acústicos deseados. Se considera de capital importancia la diferenciación que se hace entre aislamiento acústico y acondicionamiento acústico, dos términos

que con frecuencia se utilizan indistintamente de forma errónea, ya que suponen dos formas de actuación diferentes.

En el Capítulo 3 se afronta la problemática de la contaminación acústica. La publicación y entrada en vigor de numerosa normativa en relación con la protección contra el ruido durante la primera década de los años 2000 establece un marco global de referencia en la regulación de la contaminación acústica hasta ese momento insuficiente y disperso. De esta forma, la gestión del ruido se integra en la planificación estratégica de una población, como consecuencia, entre otros factores, del proceso edificatorio.

La publicación de la Ley 37/2003 del Ruido supone la presencia por primera vez en España de una norma general reguladora del ruido de fuerte implicación en la construcción, al considerar a los edificios como receptores acústicos. Además, la Ley del Ruido requería de una normativa que verifique las condiciones acústicas de las edificaciones: el Documento Básico DB-HR de Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación. Por lo tanto, la mayor exigencia actual en cuanto a protección frente al ruido frente a la antigua e insuficiente Norma Básica de la Edificación permite el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica interiores impuestos por la Ley del Ruido. El establecimiento de este marco legal también provocó, indirectamente, la obtención de nuevas soluciones constructivas fruto del estudio de los materiales.

Como se expone en el Capítulo 4, el CTE afecta a todos los agentes de la edificación, desde el promotor hasta el usuario, lo que se traduce en cambios en la redacción de proyectos, exigencias mayores en la ejecución de obra y la necesidad de adaptación a los criterios del CTE de los productos y elementos que ofrece el mercado. Particularizando para la consecución de los objetivos acústicos que dicta la normativa, se recopilan una serie de buenas prácticas y se remarca la necesidad de actuar a lo largo de todas las fases del proceso constructivo. Llevar estos dos factores a la realidad conlleva un incremento en los costes de la edificación pero siempre muy inferior a lo que supondría corregir unas condiciones acústicas defectuosas con la obra terminada.

Creo conveniente hacer hincapié en las obras de rehabilitación ya que en la actualidad la obra nueva está sufriendo un descenso moderado y convive con un cierto auge de la rehabilitación. En España tenemos un sector del parque inmobiliario de cierta antigüedad y la redacción del CTE en cuanto a reformas y rehabilitaciones tiene un carácter demasiado restrictivo y un enfoque directo a la obra nueva. Todo esto provoca que las exigencias del confort acústico por parte de la sociedad no siempre se consigan.

Por último, en el Capítulo 5 se aborda la problemática que supone la elección de los revestimientos para la dotación de unas condiciones acústicas óptimas de un recinto por medio de un caso práctico donde se realiza el acondicionamiento acústico de un aula. Se parte, como hemos visto, de una sala con unas características acústicas inapropiadas para el uso al que se pretende destinar y se ofrecen tres diferentes propuestas que subsanan el

problema desde el punto de vista técnico y se realiza el consiguiente estudio económico de las mismas.

Partimos de la base de que se elegirá aquella solución que, ajustándose a los requerimientos del peticionario, conlleve el menor gasto. Las tres soluciones cumplen con los requisitos de la normativa y tienen unos costes finales muy parejos.

La solución 1 proporciona los mejores valores del tiempo de reverberación y absorción acústica pero también tiene el coste más elevado. La solución 2 supone la opción más económica y tiene unos valores acústicos intermedios entre las tres soluciones. Por último, la solución 3 se sitúa desde el punto de vista económico entre las dos restantes pero ofrece los peores valores tanto del tiempo de reverberación como de absorción acústica. La solución 3 también conlleva unos elevados gastos de mantenimiento por lo que su elección vendría motivada única y exclusivamente por razones estéticas o por la necesidad de mantener el volumen inicial del recinto, ya que esta solución carece de falso techo. Realizado el estudio, mi elección, siempre supeditada a las pretensiones del propietario, sería la solución 2 por las razones expuestas anteriormente.

ANEXO

A

TABLAS DE LA OPCIÓN SIMPLIFICADA DEL DB-HR.

CONTENIDO

Tabla 3.2. Parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separación verticales.

Tabla 3.3. Parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separación horizontales.

Tabla 3.4. Parámetros acústicos de *fachadas*, *cubiertas* y suelos en contacto con el aire exterior de *recintos protegidos*.

Tabla I.1. Parámetros de los componentes de los elementos de separación horizontales, cuando las viviendas comparten la estructura horizontal.

ANEXO A. TABLAS DE LA OPCIÓN SIMPLIFICADA DEL DB-HR.

En este anexo se incluyen las tablas del DB-HR que deben usarse en la opción simplificada que propone dicho Documento Básico para el cumplimiento de las exigencias acústicas; y a las que hace referencia el Capítulo 4.

Tabla 3.2. Parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separación verticales

Elementos de separación verticales				
Tipo	Elemento base ⁽¹⁾⁽²⁾ (Eb – Ee)		Trasdosado ⁽³⁾ (Tr) (en función de la tabiquería)	
			Tabiquería de fábrica o paneles prefabricados pesados ⁽⁴⁾	Tabiquería de entramado autoportante
	m (kg/m ²)	R _A (dBA)	ΔR _A (dBA)	ΔR _A (dBA)
Tipo 1 Una o dos hojas de fábrica con trasdosado	67	33		16 ⁽⁸⁾⁽¹¹⁾
	120	38		14 ⁽⁸⁾⁽¹¹⁾
	150 ⁽⁷⁾	41 ⁽⁷⁾	16 ⁽⁸⁾	13 ⁽¹¹⁾
	180	45	13	9 ⁽¹¹⁾ (12) ⁽¹¹⁾
	200	46	11 ⁽¹¹⁾	10 ⁽¹³⁾ (10) ⁽¹¹⁾
	250	51	6 ⁽¹³⁾	13 ⁽¹¹⁾
	300	52	3 ⁽¹³⁾ 8 (9)	3 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹³⁾
	300 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾	-	-
	350	55	5 ⁽¹³⁾ (8) ⁽¹¹⁾	0 ⁽¹³⁾ (6) ⁽¹³⁾
	400	57	0 ⁽¹³⁾ 2 ⁽¹³⁾ (6) ⁽¹³⁾	0 ⁽¹³⁾ (6) ⁽¹³⁾
Tipo 2 Dos hojas perimetrales con bandas elásticas perimétricas	130 ⁽⁵⁾	54 ⁽⁵⁾	-	-
	170 ⁽⁵⁾	54 ⁽⁵⁾	-	-
	(200) ⁽⁶⁾	(61) ⁽⁶⁾	-	-
Tipo 3 Entramado autoportante	44 ⁽¹²⁾	58 ⁽¹²⁾		
	(52) ⁽⁹⁾	(64) ⁽⁹⁾		
	(60) ⁽¹⁰⁾	(68) ⁽¹⁰⁾		

(1) En el caso de elementos de separación verticales de dos hojas de fábrica, el valor de m corresponde al de la suma de las masas por unidad de superficie de las hojas y el valor de R_A corresponde al del conjunto.

(2) Los elementos de separación verticales deben cumplir simultáneamente los valores de masa por unidad de superficie, m y de índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A.

(3) El valor de la mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, Δ R_A, corresponde al de un trasdosado instalado sobre un elemento base de masa mayor o igual a la que figura en la tabla 3.2.

(4) La columna tabiquería de fábrica o paneles prefabricados pesados se aplica indistintamente a todos los tipos de tabiquería de fábrica o *paneles prefabricados pesados* incluidos en el apartado 3.1.2.3.1.

(5) La masa por unidad de superficie de cada hoja que tenga *bandas elásticas* perimétricas no será mayor que 150 kg/m^2 y en el caso de los elementos de tipo 2 que tengan *bandas elásticas* perimétricas únicamente en una de sus hojas, la hoja que apoya directamente sobre el forjado debe tener un índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A , de al menos 42 dBA.

(6) Esta solución es válida únicamente para tabiquería de *entramado autoportante* o de fábrica o *paneles prefabricados pesados* con *bandas elásticas* en la base, dispuestas tanto en la tabiquería del *recinto de instalaciones*, como en la del *recinto protegido* inmediatamente superior. Por otra parte, esta solución no es válida cuando acometan a *medianerías* o *fachadas* de una sola hoja ventiladas o que tengan en aislamiento por el exterior.

La masa por unidad de superficie de cada hoja que tenga *bandas elásticas* perimétricas no será mayor que 150 kg/m^2 y en el caso de los elementos de tipo 2 que tengan *bandas elásticas* perimétricas únicamente en una de sus hojas, la hoja que apoya directamente sobre el forjado debe tener un índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A , de al menos 45 dBA.

(7) Esta solución es válida si se disponen *bandas elásticas* en los encuentros del elemento de separación vertical con la tabiquería de fábrica que acomete al elemento, ya sea ésta con apoyo directo o con *bandas elásticas*.

(8) Estas soluciones no son válidas si acometen a una fachada o *medianería* de una hoja de fábrica o ventilada con la hoja interior de fábrica o de hormigón.

(9) Esta solución de tipo 3 es válida para *recintos de instalaciones* o de *actividad* si se cumplen las condiciones siguientes:

– Se dispone en el *recinto de instalaciones* o *recinto de actividad* y en el *recinto habitable* o *recinto protegido* colindante horizontalmente un suelo flotante con una mejora del índice global de reducción acústica, ponderado

A, ΔR_A mayor o igual que 6 dBA;

– Además, debe disponerse en el *recinto de instalaciones* o *recinto de actividad* un techo suspendido con una mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, ΔR_A mayor o igual que:

i. 6dBA, si el recinto de instalaciones es interior o el elemento de separación vertical acomete a una fachada ligera, con hoja interior de entramado autoportante;

ii. 12dBA, si el elemento de separación vertical de tipo 3 acomete a una *medianería* o fachada pesada con hoja interior de entramado autoportante.

Independientemente de lo especificado en esta nota, los suelos flotantes y los techos suspendidos deben cumplir lo especificado en el apartado 3.1.2.3.5.

(10) Solución válida si el forjado que separa el recinto de instalaciones o recinto de actividad de un recinto protegido o habitable tiene una masa por unidad de superficie mayor que 400 kg/m^2 .

(11) Valores aplicables en combinación con un forjado de masa por unidad de superficie, m, de al menos 250 kg/m^2 y un suelo flotante, tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor, con una mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, ΔR_A mayor o igual que 4dBA;

(12) Valores aplicables en combinación con un forjado de masa por unidad de superficie, m, de al menos 200 kg/m^2 y un suelo flotante y un techo suspendido, tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor, con una mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, ΔR_A mayor o igual que 10 dBA y 6 dBA respectivamente;

(13) Valores aplicables en combinación con un forjado de masa por unidad de superficie, m, de al menos 175 kg/m^2 .

Independientemente de lo especificado en las notas 10, 11 y 12, los suelos flotantes y los techos suspendidos deben cumplir lo especificado en el apartado 3.1.2.3.5.

Tabla 3.3. Parámetros acústicos de los componentes de los elementos de separación horizontales.

Forjado $F^{(1)}$		Suelo flotante y techo suspendido (Sf) y (Ts) en función de la tabiquería									
		Tabiquería de fábrica o de paneles prefabricados pesados con apoyo directo en el forjado			Tabiquería de fábrica o de paneles prefabricados pesados con bandas elásticas o apoyada sobre el suelo flotante.			Tabiquería de entramado autoportante			
		Suelo flotante ⁽²⁾⁽³⁾		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Suelo flotante ⁽²⁾⁽³⁾		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Suelo flotante ⁽²⁾⁽³⁾		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Condi- ciones de la facha- da ⁽⁶⁾
m Kg/m ²	R _A dBA	ΔL_w dB	ΔR_A dBA	ΔR_A dBA	ΔL_w dB	ΔR_A dBA	ΔR_A dBA	ΔL_w dB	ΔR_A dBA	ΔR_A dBA	
175	44				26	3 15	15 4	26	0	8	2H
									2	7	
									6	5	
									7	1	
									8	0	
									4	15	
		9	12	1H							
		14	5								
		15	4								
		19	3								
		(4)	(15)								
		(9)	(10)								
200	45				25	2 8 15	15 5 2	24	0	7	2H
									2	6	
									4	5	
									6	1	
									7	0	
									2	15	
		9	5	1H							
		15	2								
		(1)	(15)								
		(2)	(14)								
		(9)	(7)								
		(11)	(5)								
(16)	(0)	2H									
(30)	(14) (15) (19)		(15) (14) (11)	(29)							
225	47				24	0 2 5 15 17	15 8 5 1 0	23	0	4	2H
									2	3	
									4	0	
									0	15	
									2	8	
									5	5	
		9	2	1H							
		14	1								
		15	0								
		(0)	(13)								
		(2)	(11)								
		(8)	(5)								
(9)	(4)	2H									
(12)	(1)										
(13)	(0)										
(29)	(9) (15) (19)		(15) (9) (7)	(28)							

Forjado F ⁽¹⁾		Suelo flotante y techo suspendido (Sf) y (Ts) en función de la tabiquería									
		Tabiquería de fábrica o de paneles prefabricados pesados con apoyo directo en el forjado			Tabiquería de fábrica o de paneles prefabricados pesados con bandas elásticas o apoyada sobre el suelo flotante.			Tabiquería de entramado autoportante			
		Suelo flotante ^{(2)/(3)}		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Suelo flotante ^{(2)/(3)}		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Suelo flotante ^{(2)/(3)}		Techo suspendido ⁽⁵⁾	Condiciones de la fachada ⁽⁶⁾
m Kg/m ²	R _A dBA	ΔL _w dB	ΔR _A dBA	ΔR _A dBA	ΔL _w dB	ΔR _A dBA	ΔR _A dBA	ΔL _w dB	ΔR _A dBA	ΔR _A dBA	
250	49				22	0 2 9	10 5 0	21	0 2	2 0	2H
									0 2 9	9 5 0	1H
					(27)	(6) (9)	(15) (10)	(26)	(0) (2) (6) (9) (11)	(11) (9) (5) (2) (0)	2H
300 ⁽⁴⁾	52	18	3 8 9	15 5 4	16	0 2 4	4 1 0	16	0	0	2H
									0 2	2 0	1H
					(21)	(3) (7) (8) (9)	(15) (6) (5) (4)	(21)	(0) (2) (5) (10) ⁽⁷⁾	(5) (4) (0) (0) ⁽⁷⁾	2H
									(7) (9)	(15) (11)	
350 ⁽⁴⁾	54	16	0 1 2 8 12	12 8 5 1 0	15	0	0	14	0 0 5	0 5 0	1H ó 2H
					(19)	(1) (4) (5) (8)	(11) (5) (4) (2)		(19)	(0) (2) (3) (8) ⁽⁷⁾	(3) (2) (0) (0) ⁽⁷⁾
										(5) (7) (8)	(7) (5) (4)
400 ⁽⁴⁾	57	14	0 2 9 5 2	2 0 2 5 15	12	0	0	11	0	0	1H ó 2H
					(17)	(0) (4) (6) (10) ⁽⁷⁾	(6) (1) (0) (0) ⁽⁷⁾		(16)	(0) (5) ⁽⁷⁾	(0) (0) ⁽⁷⁾
										(0) (1) (4) (6) (8) (9) ⁽⁷⁾	(9) (7) (3) (1) (0) (0) ⁽⁷⁾
450	58	12	0 0 5	0 4 0	10	0	0	10	0	0	1H ó 2H
					(15)	(0) (3) (6) ⁽⁷⁾	(3) (0) (0) ⁽⁷⁾		(15)	(0) (4) ⁽⁷⁾	(0) (0) ⁽⁷⁾
										(0)	(4)

								(3) (4) (7) ⁽⁷⁾	(2) (0) (0) ⁽⁷⁾	
	12	0	0	10	0	0	9	0	0	1H ó 2H
500	60							(0) (1) ⁽⁷⁾	(0) (0) ⁽⁷⁾	2H
	(17)	(4) (5)	(7) (5)	(15)	(0) (3) ⁽⁷⁾	(0) (0) ⁽⁷⁾	(14)	(0) (1) (3) ⁽⁷⁾	(1) (0) (0) ⁽⁷⁾	1H

(1) Los forjados deben cumplir simultáneamente los valores de masa por unidad de superficie, m y de índice global de reducción acústica ponderado A , R_A .

(2) Los *suelos flotantes* deben cumplir simultáneamente los valores de reducción del nivel global de presión de ruido de impactos, ΔL_w , y de mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A , ΔR_A .

(3) Los valores de mejora del aislamiento a ruido aéreo, ΔR_A , y de reducción de ruido de impactos, ΔL_w , corresponden a un único *suelo flotante*; la adición de mejoras sucesivas, una sobre otra, en un mismo lado no garantiza la obtención de los valores de aislamiento.

(4) En el caso de forjados con piezas de entrevigado de poliestireno expandido (EPS), el valor de ΔL_w correspondiente debe incrementarse en 4dB.

(5) Los valores de mejora del aislamiento a ruido aéreo, ΔR_A , corresponden a un único techo suspendido; la adición de mejoras sucesivas, una bajo otra, en un mismo lado no garantiza la obtención de los valores de aislamiento.

(6) Para limitar las transmisiones por flancos, en el caso de la tabiquería de entramado autoportante, en la tabla 3.3 aparecen los símbolos:

– 1H, para fachadas o *medianerías* de 1 hoja o fachadas ventiladas de fábrica o de hormigón, que deben cumplir;

i. la masa por unidad de superficie, m , de la hoja de fábrica o de hormigón deber ser al menos 135kg/m^2 ;

ii. el índice global de reducción acústica, ponderado A , R_A , de la hoja de fábrica o de hormigón debe ser al menos 42dBA.

– 2H, para fachadas o *medianerías* de dos hojas, que deben cumplir:

i. para las fachadas pesadas no ventiladas o ventiladas por el exterior de la hoja principal con la hoja interior de *entramado autoportante* o adherido:

– la masa por unidad de superficie, m , de la hoja exterior deber ser al menos 145kg/m^2 ;

– el índice global de reducción acústica, ponderado A , R_A , de la hoja exterior debe ser al menos 45dBA.

ii. para las fachadas o *medianerías* pesadas ventiladas por el interior de la hoja principal o ligeras ventiladas o no ventiladas, con la hoja interior de *entramado autoportante*:

– la masa por unidad de superficie, m , de la hoja interior deber ser al menos 26kg/m^2 ;

– el índice global de reducción acústica, ponderado A , R_A , de la hoja interior debe ser al menos 43dBA;

Las soluciones para fachada de dos hojas también son aplicables en el caso de que los recintos sean interiores.

(7) Soluciones de elementos de separación horizontales específicas para el caso de garajes.

Tabla 3.4 Parámetros acústicos de fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior de recintos protegidos.

Nivel límite exigido $D_{2m,nT,Atr}$ dBA	Parte ciega 100% $R_{A,tr}$ dBA	Parte ciega ≠ 100% $R_{A,tr}$ dBA	Huecos Porcentaje de huecos $R_{A,tr}$ de los componentes del hueco ⁽²⁾ dBA				
			Hasta 15%	De 16% a 30%	De 31% a 60%	De 61% a 80%	De 81% a 100%
$D_{2m,nT,Atr} = 30$	33	35	26	29	31	32	33
		40	25	28	30	31	
		45	25	28	30	31	
$D_{2m,nT,Atr} = 32$	35	35	30	32	34	34	35
		40	27	30	32	34	
		45	26	29	32	33	
$D_{2m,nT,Atr} = 34^{(1)}$	36	40	30	33	35	36	36
		45	29	32	34	36	
		50	28	31	34	35	
$D_{2m,nT,Atr} = 36^{(1)}$	38	40	33	35	37	38	38
		45	31	34	36	37	
		50	30	33	36	37	
$D_{2m,nT,Atr} = 37$	39	40	35	37	39	39	39
		45	32	35	37	38	
		50	31	34	37	38	
$D_{2m,nT,Atr} = 41^{(1)}$	43	45	39	40	42	43	43
		50	36	39	41	42	
		55	35	38	41	42	
$D_{2m,nT,Atr} = 42$	44	50	37	40	42	43	44
		55	36	39	42	43	
		60	36	39	42	43	
$D_{2m,nT,Atr} = 46^{(1)}$	48	50	43	45	47	48	48
		55	41	44	46	47	
		60	40	43	46	47	
$D_{2m,nT,Atr} = 47$	49	55	42	45	47	48	49
		60	41	44	47	48	
$D_{2m,nT,Atr} = 51^{(1)}$	53	55	48	50	52	53	53
		60	46	49	51	52	

(1) Los valores de estos niveles límite se refieren a los que resultan de incrementar 4 dBA los exigidos en la tabla 2.1, cuando el ruido exterior dominante es el de aeronaves.

(2) El índice $R_{A,tr}$ de los componentes del hueco expresado en la tabla 3.4 se aplica a las ventanas que dispongan de aireadores, sistemas de microventilación o cualquier otro sistema de abertura de admisión de aire con dispositivos de cierre en posición cerrada

Tabla I.1 Parámetros de los componentes de los elementos de separación horizontales, cuando las viviendas comparten la estructura horizontal.

Forjado F ⁽¹⁾		Suelo flotante ⁽²⁾⁽³⁾ (Sf) en función del elemento de separación vertical					
		Elemento de separación vertical tipo 1		Elemento de separación vertical tipo 2		Elemento de separación vertical tipo 3	
		m Kg/m ²	R _A dBA	ΔL _w dB	ΔR _A dBA	ΔL _w dB	ΔR _A dBA
174	44	14	10	22	10	23	10
200	45	13	10	20	10	21	10
225	47	13	10	19	10	20	10
250 ⁽⁴⁾	49	8	10	13	10	14	10
300 ⁽⁴⁾	52	9	0	11	0	12	0

(1) Los forjados deben cumplir simultáneamente los valores de masa por unidad de superficie, m y de índice global de reducción acústica, ponderado A, R_A.

(2) Los *suelos flotantes* deben cumplir simultáneamente los valores de reducción del nivel global de presión de ruido de impactos, ΔL_w, y de mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, ΔR_A.

(3) Los valores de mejora del aislamiento a ruido aéreo, ΔR_A, y de reducción de ruido de impactos, ΔL_w, corresponden a un único *suelo flotante*; la adición de mejoras sucesivas, una sobre otra, en un mismo lado no garantiza la obtención de los valores de aislamiento.

(4) En el caso de forjados con piezas de entrevigado de poliestireno expandido (EPS), este valor de ΔL_w debe incrementarse en 4dB.

FUENTE DE LAS TABLAS E IMÁGENES
UTILIZADAS.

FUENTE DE LAS IMÁGENES Y TABLAS UTILIZADAS.

Fig. 1.1. *Una de las salas del Hipogeo de Paola*. Procedencia:
<http://www.deviajes.net/malta/hipogeo.htm>

Fig. 1.2. *Abertura en la Sala del Oráculo*. Procedencia:
<http://creation-designs.com/gracemillennium/winter00/html/berezan.htm>

Fig. 1.3. *Pinturas de la tumba de Nakht*. Procedencia:
<http://www.pinturayartistas.com/estilos-pictoricos-arte-egipcio-antiguo/>

Fig. 1.4. *Capitel de columna en forma de sistro*. Procedencia:
<http://www.egiptologia.com/mujer-en-el-antiguo-egipto/365-el-sistro-sonajero-sagrado.html>

Fig. 1.5. *Partes de un teatro griego*. Procedencia: <http://www.clg-tremonteix-clermont-ferrand.ac-clermont.fr/sitemusique/textes/lieux/theatre.htm>

Fig. 1.6. *Vista del teatro de Epidauro*. Procedencia:
<http://historiaearquitectura.blogspot.com.es/2012/01/teatro-de-epidauro-grecia.html>

Fig. 1.7. *Vista de las gradas del teatro de Epidauro*. Procedencia:
<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/71-desvelado-el-misterio-acco-del-teatro-de-epidauro.html>

Fig. 1.8. *Teatro griego (izq.) y teatro romano (der.)*. Procedencia:
http://edwinedeno.blogspot.com.es/2009_07_01_archive.html

Fig. 1.9. *“De Architectura” de Vitruvio*. Procedencia:
<http://www.artifexbalear.org/vitruvio.htm>

Fig. 1.10. *Planta de la Iglesia del Gesù de Vignola*. Procedencia:
http://web.educastur.princast.es/proyectos/jimena/pj_leontinaai/arte/webimarte2/WEBIMAG/MANIERISMO/vi%C3%B1ola.htm

Fig. 1.11. *Galileo y el péndulo*. Procedencia:
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/128/htm/sec_6.htm

Fig. 1.12. *Teatro Olímpico de Vicenza*. Procedencia:
<http://www.socialhistoryofart.com/apps/photos/photo?photoid=166783570>

Fig. 1.13. *Resonador de von Helmholtz*. Procedencia:
<http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza//acustica/apuntes/acuarq/acuarq.html>

Fig. 1.14. *Teatro Farnese*. Procedencia:
<http://es.visititaly.com/viajar/parma/el-teatro-farnese-y-sus-curiosidades.aspx>

Fig. 1.15. *Diseño de planta oval de Pierre Patté*. Procedencia:
http://gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca_digital/Congresos/CNHC2/CNHC2_036.pdf

Fig. 1.16. *Comparativa de tres teatros de ópera*. Theatise on Theatres.
Procedencia:http://gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca_digital/Congresos/CNHC2/CNHC2_036.pdf

Fig. 1.17. *Vista del Chichén Itzá*. Procedencia:
<http://www.portalciencia.net/chichenitza.html>

Fig. 1.18. *Escalera de la Pirámide de Kukulcán*. Procedencia:
<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/89-acca-de-chichitz.html>

Fig. 1.19. *Poblado de Palenque*. Procedencia:
<http://www.acusticaweb.com/acustica-arquitectonica/blog/acca-arquitectura/edificios-de-la-ciudad-de-palenque.html>

Fig. 1.20. *Reflexiones en una cúpula*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Acoustic solution in classic Ottoman architecture”, de Mutbul Kayili, pág. 9. Disponible en:
<http://www.muslimheritage.com/uploads/Acoustic.pdf>

Fig. 1.21. *Resonador de La Mezquita Azul*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Acoustic solution in classic Ottoman architecture”, de Mutbul Kayili, pág. 9. Disponible en:
<http://www.muslimheritage.com/uploads/Acoustic.pdf>

Fig. 1.22. *Resonadores escondidos en la cúpula de Suleymaniye*. Procedencia:
<http://www.muslimheritage.com/uploads/Acoustic.pdf>

Fig. 1.23. *Naturaleza multidisciplinar de la acústica*. Procedencia:
“Temas de Acústica” de Antonio Durá Doménech, pág. 16.

Fig. 1.24. *Explicación gráfica del “susurro de salas”*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higinio Arau, pág. 245.

Fig. 1.25. *Boston Symphony Hall*. Procedencia:
http://www.nai.nl/content/8757/akoustiek_voor_het_voetlicht

Fig. 1.26. *Ladrillo patentado por Gustavino & Co.* para la mejora acústica de edificios. Procedencia: http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_103.pdf

Fig. 2.1. *Evolución de la presión sonora total en función del tiempo*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Guía acústica de la construcción” de Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo y César Díaz Sanchidrián, pág. 17.

Fig. 2.2 .*Curvas de ponderación A, B y C*. Procedencia:
<http://www.doctorproaudio.com/content.php?145-ponderaciones-weightings-frecuencia-ABC>

Fig. 2.3. *Curvas isofónicas de igual sonoridad*. Procedencia:
<http://html.rincondelvago.com/ondas-y-acustica.html>

Fig. 2.4. *El PSIL en función de la distancia entre emisor y receptor*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higiní Arau, pág. 67.

Fig. 2.5. *Obtención del ITDG a partir del ecograma*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higiní Arau, pág. 261.

Fig. 2.6. *Esquema de funcionamiento de un sonómetro*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higiní Arau, pág. 77.

Fig. 2.7. *Absorción acústica*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en:
<http://acusticarquitectonicaymedioambiental.blogspot.com.es/2010/04/diferencia-entre-absorcion-acustica-y.html>

Fig. 2.8. *Presencia de ruido aéreo en vivienda*. Procedencia:
<http://www.chileacustica.com/2010/07/aislamiento-del-ruido-aereo-iso-140-4/>

Fig. 2.9. *Aislamiento acústico de cerramiento simple*. Procedencia:
http://www.pladur-barcelona.es/aislamiento_acustico.html

Fig. 2.10. *Aislamiento acústico de cerramiento doble*. Procedencia:
http://www.pladur-barcelona.es/aislamiento_acustico.html

Fig. 2.11. *Presencia de ruido de impacto en recinto público*. Procedencia:
http://www.arch-tec.com.br/Espanol/html/Acustica_Arquitetonica_tx_compl.html

Fig. 2.12. *Presencia de transmisiones laterales en ruido de impacto (izq.) y aéreo (der.)*. Procedencia:
http://www.pladur-barcelona.es/aislamiento_acustico.html

Fig. 2.13. *Efecto de la absorción acústica*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Guía acústica de la construcción” de Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo y César Díaz Sanchidrián, pág. 79.

Tabla 2.1. *Velocidad de propagación del sonido según diferentes materiales*. Elaboración propia basada en la tabla contenida en el artículo “Fundamentos de Acústica” de Josep Solé, pág. 2. Disponible en:

http://www.telefonica.net/web2/josepsolebonet/index_archivos/fitxers/FUNDAMENTOS%20DE%20ACUSTICA.pdf

Tabla. 2.2. *Factor de mérito para un valor dado de STI*. Elaboración propia basada en la información contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higiní Arau, pág. 267.

Tabla 2.3. *Representación gráfica de las curvas NR y valores recomendados del índice NR para diferentes locales*. Elaboración propia basada en la ilustración y datos contenidos en “Confort acústico. Examen de diferentes metodologías de evaluación de riesgo” de Francisco Javier Florido Díaz, pág. 4. Disponible en:

http://www.juntadeandalucia.es/empleo/recursos/dg_prl/prevexpo/2008/documentos/comunicaciones_orales/dia_25/2008_09_25-sala1-3_confort_acustico_examen_metodologias_evaluacion_riesgo.pdf

Tabla 2.4. *Representación gráfica de las curvas NC y valores recomendados del índice NC para diferentes locales*. Elaboración propia basada en la ilustración y datos contenidos en “Confort acústico. Examen de diferentes metodologías de evaluación de riesgo” de Francisco Javier Florido Díaz, pág. 4. Disponible en:

http://www.juntadeandalucia.es/empleo/recursos/dg_prl/prevexpo/2008/documentos/comunicaciones_orales/dia_25/2008_09_25-sala1-3_confort_acustico_examen_metodologias_evaluacion_riesgo.pdf

Tabla 2.5. *Representación gráfica de las curvas PNC y valores recomendados del índice PNC para diferentes locales*. Elaboración propia basada en la ilustración y datos contenidos en “Confort acústico. Examen de diferentes metodologías de evaluación de riesgo” de Francisco Javier Florido Díaz, pág. 5. Disponible en:

http://www.juntadeandalucia.es/empleo/recursos/dg_prl/prevexpo/2008/documentos/comunicaciones_orales/dia_25/2008_09_25-sala1-3_confort_acustico_examen_metodologias_evaluacion_riesgo.pdf

Las tablas 2.6 hasta 2.14 contenidas en el apartado 2.1.1.1 Parámetros acústicos y factores de mérito de un recinto son de elaboración propia basadas en la información contenida en “ABC de la acústica arquitectónica” de Higiní Arau, pág. 261-267.

Fig. 3.1 *Cuadro resumen cronológico de la normativa en el sector de la edificación en España*. Elaboración propia.

Fig. 3.2. *Relación entre la Ley del Ruido y el DB-HR*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido”, pág. 9.

Fig. 3.3. *De la LOE al CTE*. Elaboración propia.

Tabla 3.1. *Valores guía para el ruido comunitario en ambientes específicos (OMS) 2000*. Elaboración propia basada en la tabla contenida en las Guías de la Organización Mundial de la Salud. 2000.

Tabla 3.2. *Niveles máximos de inmisión recomendados para los locales. Tabla 5.1 Anexo 5, NBE CA-88*. Elaboración propia basada en la tabla 5.1 del Anexo 5 de la NBE CA-88.

Tabla 3.3. *Comparativa de los índices de aislamiento del DB-HR con los de la NBE-CA-88*. Elaboración propia basada en “La trayectoria normativa en acústica para la edificación” de Luis Vega Catalán, pág. 8, 2009. Disponible en: <http://www.five.es/cursos-jornadas/pdf/1_la%20trayectoria.pdf>.

Tabla 3.4. *Comparativa de los niveles de exigencia de aislamiento del DB-HR con los de la NBE-CA-88*. Elaboración propia basada en la tabla contenida en “Guía acústica de la construcción” de Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo y César Díaz Sanchidrián, pág. 185.

Fig. 4.1. *Tipos de tabiquería que contempla el DB-HR*. Procedencia: DB-HR, fig. 3.3.

Fig. 4.2. *Composición de los elementos de separación entre recintos según DB-HR*. Procedencia: DB-HR, fig. 3.2.

Las ilustraciones que acompañan el desarrollo de los apartados contenidos en el apartado: “Criterios y recomendaciones de diseño. Encuentros entre elementos constructivos” son de elaboración propia basadas en las contenidas en las fichas de elementos constructivos contenidas en “Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido”, pág. 115 – pág. 237.

Fig. 4.3. *El capialzado como vía de penetración de ruido*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido”, pág. 103.

Fig. 4.4. *Actuación sobre el suelo en forjado de madera*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Soluciones de rehabilitación acústica de edificios” de José Ángel Gamallo, pág. 18. Disponible en: <http://www.danosarehabilitacion.com/images/PDF/rehabilitacion_acustica_2011.pdf>.

Fig. 4.5. *Forrado de bajante*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Soluciones de rehabilitación acústica de edificios” de José Ángel Gamallo, pág. 35. Disponible en: <http://www.danosarehabilitacion.com/images/PDF/rehabilitacion_acustica_2011.pdf>.

Fig. 4.6. *Máxima profundidad de la zona situada debajo de un balcón o anfiteatro*. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” de Antoni Carrión Isbert, pág. 195.

Fig. 4.7. Soluciones para la prevención o eliminación de ecos. Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” de Antoni Carrión Isbert, pág. 209.

Fig. 4.8. *Generación de primeras reflexiones según las diferentes tipologías de salas de conciertos.* Elaboración propia basada en la ilustración contenida en “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” de Antoni Carrión Isbert, pág. 252 – pág. 261.

Fig. 4.9. *Sala sinfónica de Las Palmas de Gran Canaria (izq.) y el Royal Albert Hall (Londres) (der.)* Parte izquierda de la foto: Sala sinfónica de Las Palmas de Gran Canaria. Procedencia:
<http://librodeoro.com/libro0708/auditorio13.html>

Parte derecha de la foto: Royal Albert Hall (Londres). Procedencia:
<http://www.vacacionaviajes.com/blog/los-mejores-lugares-del-mundo-para-escuchar-musica/>

Tabla 4.1. *Relación entre material, espesor y $R_{A,tr}$.* Elaboración propia basada en la tabla contenida en “Guía acústica de la construcción” de Fco. Javier Rodríguez Rodríguez, Javier de la Puente Crespo y César Díaz Sanchidrián, pág. 285.

Las ilustraciones que se incluyen en el apartado 5.1.2 “Memoria descriptiva” provienen de catálogos comerciales facilitados por la empresa correspondiente que se indica en el encabezado de las mismas.

Las ilustraciones que se incluyen el apartado 5.4 “Documentación gráfica” son de elaboración propia realizadas con los programas Trimble SketchUp© y V-Ray©.

Foto de portada. Elaboración propia basada en las fotografías disponibles en Internet y modificadas con el programa Adobe Photoshop©:

<http://web.educastur.princast.es/proyectos/grupotecne/asp1/investigacion/ver_mensajebbb.asp?idmensaje=2805>

<<http://www.lasalle.es/santanderapuntos/arte/grecia/arquitectura/epidauro.htm>>

Bibliografía general .

PUBLICACIONES IMPRESAS.

ARAU-PUCHADES, Higinio. *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: Ediciones CEAC, 1999. ISBN: 84-329-2017-7.

CARRIÓN ISBERT, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1º Edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.

DURÁ DOMENECH, Antonio. *Temas de acústica*. Alicante: Universidad de Alicante, 2005. ISBN: 84-7908-816-8.

LONG, Marshall. *Architectural Acoustics*. 1º Edición. Burlington (Estados Unidos): Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 13:978-0-12-45555-18.

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Francisco Javier; DE LA PUENTE CRESPO, Javier; DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *Guía acústica de la construcción*. 2º Edición. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000. ISBN: 978-84-96437-81-4.

REFERENCIAS DE DOCUMENTOS Y DE RECURSOS ELECTRÓNICOS.

ARAU-PUCHADES, Higinio. Revisión del tiempo de reverberación. El método de cálculo, la precisión predictiva y la ley [en línea]. *ArauAcústica*. Disponible en Internet: <http://www.arauacustica.com/files/publicaciones/pdf_esp_27.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

BERGLUND, Birgitta; LINDVALL Thomas; SCHWELLA, Dietrich H. *Guía para el ruido urbano*. Traducción del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. Organización Mundial de la Salud. 1995. Disponible en Internet: <http://www.juristas-ruidos.org/Documentacion/guia_oms_ruido_1.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Desvelado el misterio acústico del teatro de Epidauro [en línea]. *Acústicaweb*. 2007. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/71-desvelado-el-misterio-acco-del-teatro-de-epidauro.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Acústica del Chichén Itzá [en línea]. *Acústicaweb*. 2007. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/acustica-arquitectonica/blog/acca-arquitecta/acca-de-chichitz.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. El efecto de la gota de agua en las pirámides mesoamericanas [en línea]. *AcústicaWeb*. 2009. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/306-el-efecto-de-la-gota-de-agua-en-las-pirides-mesoamericanas.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Edificios acústicos en la ciudad de Palenque [en línea]. *AcústicaWeb*. 2011. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/399-edificios-de-la-ciudad-de-palenque.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

CASADEVALL, David. Sala del oráculo del Hipogeo de Paola en Malta [en línea]. *Acústicaweb*. 2013. Disponible en Internet: <<http://www.acusticaweb.com/blog/acustica-arquitectonica/473-sala-del-oraculo-del-hipogeo-paola-en-malta.html>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

DÍAZ SANCHIDRIÁN, César. *La acústica en la edificación española, análisis de la situación actual* [en línea]. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en Internet: <http://www.aemcm.net/archivos/p2_1_2_acustica.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA. *La actuación contra el ruido y la mejora del ambiente sonoro de nuestros municipios* [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.bizkaia.net/home2/Archivos/DPTO9/Temas/Pdf/GUIA%20TECNICA%20RUIDO%20ACTIVIDADES%20AYUNTAMIENTOS_DFB.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

DOMÍNGUEZ HUERTA, Julián. *Rehabilitación acústica de edificios: Guía de soluciones constructivas y su ejecución para la mejora del aislamiento acústico* [en línea]. AECOR. 2011. Disponible en Internet: <http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/ponencias/15/Guia_soluciones.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

FLORES PEREITA, Pedro. *Ruido y vibraciones en las instalaciones* [en línea]. Colegio de Arquitectos de Cádiz. 2011. Disponible en Internet: <http://arquitectosdecadiz.com/uploads/%C3%81reas_Construcci%C3%B3n/16.%20INASEL.%20Casos%20pr%C3%A1cticos.%20Soluciones%20constructivas.%20Pedro%20Flores%20Pereita.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

FORSTER, E.S. *The Works of Aristotle* [en línea]. 1927. Disponible en Internet: <http://archive.org/stream/worksof aristotle07arisuoft/worksof aristotle07arisuoft_djvu.txt> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GAMALLO, José Ángel. *Soluciones de rehabilitación acústica de edificios* [en línea]. Danosa. 2011. Disponible en internet: <http://www.danosarehabilitacion.com/images/PDF/rehabilitacion_acustica_2011.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GARCÍA SANZ, Benjamín; GARRIDO, Francisco Javier. *La contaminación acústica en nuestras ciudades* [en línea]. Fundación La Caixa. 2003. Disponible en Internet: <http://www.fundacio.lacaixa.es/StaticFiles/StaticFiles/48ff438045dcf010VgnVCM1000000e8cf10aRCRD/es/es12_esp.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

GÓMEZ MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Buenas prácticas acústicas en la edificación* [en línea]. Universidad de Zaragoza. 2008. Disponible en Internet: <http://www.arquitectosdecadiz.com/uploads/%C3%81reas_Construcci%C3%B3n/08.%20Buenas%20pr%C3%A1cticas%20ac%C3%BAsticas.%20Francisco%20Javier%20Mart%C3%ADnez.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

INSTITUTO EDUARDO TORROJA. *Guía de aplicación del DB HR Protección frente al ruido*. Versión V.01. 2009. Disponible en Internet: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentosadicionales/complementarios/texto_0011.html> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

KAYILI, Mutbu. *ACOUSTIC SOLUTIONS IN CLASSIC OTTOMAN ARCHITECTURE* [en línea]. Muslimheritage. 2005. Disponible en Internet: <<http://www.muslimheritage.com/uploads/Acoustic.pdf>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

LEÓN RODRÍGUEZ, Ángel Luis. *La acústica de los teatros a través de la historia* [en línea]. Sociedad Española de la Historia de la Construcción 1998. Disponible en Internet: <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC2_035.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

LÓPEZ CEBRIÁN, Íñigo. *Acústica para la arquitectura* [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.acusticarq.com/upload/contents/ACUSTICA_PARA_LA_EDIFICACION%93N> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

LÓPEZ PLANTE, Silvina. *Curso de acústica arquitectónica* [en línea]. Isover. Disponible en Internet: <http://www.isover.com.ar/descargas/acustica_arquitectonica.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MACHO STADLER, Erica. *Acústica arquitectónica* [en línea]. Universidad del País Vasco. Disponible en Internet: <http://divulgamat2.ehu.es/divulgamat15/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=487&Itemid=75> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MARTÍN GARCÍA, Marta. *La música en el antiguo Egipto* [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.jimena.com/egipto/apartados/musica2.htm>>. [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

MENÉNDEZ RODRÍGUEZ, Vicente. *Instrumentación acústica* [en línea]. García BBM. 2007. Disponible en Internet: <http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48122/componente48120.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

PERRAULT, Claudio. *Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitrubio* [en línea]. Traducido por Joseph Castañeda. Sociedad Española de la Historia de la Construcción. 1761. Disponible en Internet:

<http://www.sedhc.es/biblioteca/tratado.php?ID_pubD=41> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

REDONDO MARTÍNEZ, ESTHER. Las patentes de Gustavino & Co. en Estados Unidos (1885-1939). *Sociedad Española de la Historia de la Construcción*. 2000. Disponible en Internet:

<http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHHC3_103.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SENDRA SALAS, Juan José; NAVARRO CASAS, Jaime. Las iglesias como lugar de la música [en línea]. *Sociedad Española de la Historia de la Construcción*. 1996. Disponible en Internet:

<http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHHC1_053.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SENDRA SALAS, Juan José; NAVARRO CASAS, Jaime. El Concilio de Trento y las condiciones acústicas de las iglesias [en línea]. *Sociedad Española de la Historia de la Construcción*. 1997. Disponible en Internet:

<http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHHC1_066.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

SOLÉ, Josep, Fundamentos de acústica [en línea]. *Ursa Uralita*. Disponible en Internet:

<http://www.telefonica.net/web2/josepsolebonet/index_archivos/fitxers/FUNDAMENTOS%20DE%20ACUSTICA.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Criterios acústicos en el diseño de centros docentes [en línea]. Disponible en Internet:

<http://www.stee-eilas.org/dok/arloak/lan_osasuna/udakoikas/acust/acus3.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

VEGA CATALÁN, Luis. *La trayectoria normativa en acústica para la edificación* [en línea]. Instituto Valencia de la Edificación. 2010. Disponible en Internet:

<http://www.five.es/cursos-jornadas/pdf/1_la%20trayectoria.pdf> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

VERA GUARINÓS, JENARO. *Perspectiva histórica de la acústica* [en línea]. Analfatécnicos. Disponible en Internet:

<<http://www.analfatecnicos.net/archivos/28.PerspectivaHistoricaDeLaAcustica.pdf>> [Consulta: 07-08-2013, 16:10 h].

NORMATIVA.

UNE-EN ISO 266. Acústica. Frecuencias preferentes. AENOR. 1998.

UNE 21302-801. Vocabulario electrotécnico. Capítulo 801: Acústica y electroacústica. AENOR. 2001.

UNE-EN ISO 354. Acústica Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. AENOR. 2004.

Norma básica de edificación NBE-CA-88 sobre las condiciones acústicas de los edificios. Ministerio de obras Públicas y Urbanismo. 1988.

Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. Jefatura del Estado. 1999.

Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2003.

RD 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2005.

RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Jefatura del Estado. 2007.

Parte I. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. 2007.

Documento Básico HR: Protección frente al ruido. Ministerio de Fomento. 2009

CATÁLOGOS COMERCIALES.

Guía de materiales y soluciones acústicas. Acústica Integral. 2013. Disponible en internet:

<http://www.acusticaintegral.com/catalogos_acustica.html>

Soluciones con productos multicapa y espumas de PE para la Rehabilitación Acústica. AECOR. Disponible en Internet:

<http://www.codigotecnico.org/web/galerias/archivos/04_Presentacion_AECOR.pdf>

Soluciones de aislamiento acústico. Andimat. 2009. Disponible en Internet:

<<http://www.andimat.es/wp-content/uploads/soluciones-de-aislamiento-acustico-andimat-jun09.pdf>>

Catálogo de soluciones acústicas y térmicas para la edificación. Asociación de Fabricantes de Lanar Minerales (AFELMA), Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY). 2009. Disponible en Internet:

<http://www.aislar.com/documentos%20enlazados/Nueva_Guia%20Soluciones%20Construccion%202012.pdf>

Soluciones de impermeabilización, aislamiento térmico y acústico. Danosa. 2010. Disponible en Internet:

<http://portal.danosa.com/media/descDetalle_DESC_ARCHIVO+desDetalle_88+L1+1.pdf>

Soluciones cerámicas para la rehabilitación acústica. Hispalyt. Consultado en formato físico.

Catálogo de productos Morpa. Morpa. 2013. Disponible en Internet;
<<http://www.morpa.es/>>

Sistemas Pladur. Pladur Yesos Ibéricos. 2012. Disponible en Internet:
<<http://www.pladur.com/es-es/arquitectos/documentacion-tecnica/DocumentosTecnicos/Documento-Sistemas-Pladur.pdf>>

Catálogo de rehabilitación sostenible. URSA Uralita. 2011. Disponible en Internet:
<<http://www.ursa.es/es-es/rehabilitacion/catalogo-de-rehabilitacion-sostenible/paginas/catalogo-de-rehabilitacion-sostenible.aspx>>