



ESTUDIO DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN VARIAS DEPENDENCIAS DEL CAMPUS DE GIJÓN: EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE ACONDICIONAMIENTO.

Irene Solís Gallego^[*], Sandra Velarde Suárez^[].**
^[*] Alumna; ^[**] Tutora
uo196864@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es caracterizar las condiciones acústicas de determinadas aulas de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, realizándose al efecto un trabajo de investigación en el que se registraron, mediante la utilización de un sonómetro por medio del método impulsivo, los tiempos de reverberación correspondientes a cada aula.

Con el fin de determinar el aumento de la superficie de absorción necesaria para cumplir la legislación vigente, se efectuaron los cálculos precisos mediante la aplicación de diversas ecuaciones, y proporcionándose, a partir de ello, diversas alternativas para reducir el tiempo de reverberación y mejorar la acústica en las aulas.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the acoustic conditions of some classrooms in the Engineering Polytechnic School of Gijon, performing to achieve this, a research which register, trough the use of a sound level meter by the impulse method, the reverberation times of each classrooms.

In order to determinate the increase in the absorption surface necessary to comply with current legislation, precise computations were performed by the application of various equations, and from this, various alternatives were provided to reduce reverberation time and improve the acoustics in classrooms.

1. INTRODUCCIÓN

El campo de la acústica engloba disciplinas tan diversas como la acústica ambiental, la musical, la psicoacústica o la arquitectónica, entre otras.

En este estudio nos centraremos exclusivamente en la acústica arquitectónica y más concretamente en el diseño o acondicionamiento acústico de recintos, es decir, la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.

La existencia de una buena acústica debe garantizar una correcta inteligibilidad de la palabra y la existencia de confort acústico, es decir, que el campo sonoro existente no ha de generar ninguna molestia significativa a las personas o espectadores presentes en el recinto considerado.

Para conseguir un adecuado confort acústico a la vez que una correcta inteligibilidad de la palabra, es preciso que el ruido de fondo existente en el aula sea igual de bajo que el nivel del campo reverberante, sin que se produzcan ecos, ni focalizaciones del sonido, ni eco flotante.

En este estudio trataremos fundamentalmente el nivel del campo reverberante, entendiendo como zona del campo reverberante, aquella donde predomina el sonido reflejado o reverberante, y a la que pertenecen todos los puntos situados a una distancia en la fuente sonora superior a la distancia crítica (Dc).

Para poder definir la distancia crítica, primero habrá que diferenciar dos zonas fundamentales: en primer lugar, la



zona de campo directo, aquella donde predomina el sonido directo y a la que pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora. El nivel de presión sonora, denominado nivel de campo directo, disminuye cada vez que se dobla la distancia de la fuente. Y en segundo lugar, la zona de campo reverberante, en la que predomina el sonido reflejado y a la que pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona el nivel de presión sonora se denomina nivel de campo reverberante y se mantiene constante.

Por lo tanto, la distancia crítica D_c , es la distancia para la cual el nivel de campo directo y el nivel de campo reverberante son iguales.

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, ha de definirse el tiempo de reverberación a una frecuencia determinada, como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial. Generalmente, suele medirse el tiempo de decaimiento correspondiente a una caída de 20 o 30 dB y después se extrapola al intervalo de 60 dB.

Este tiempo de reverberación depende de las siguientes variables:

1. Capacidad de absorción y /o transmisión sonora en los contornos del recinto.
2. Frecuencia del sonido emitido.
3. Dimensiones del recinto.
4. Posiciones de la fuente y del receptor dentro el recinto.

Si el espacio objeto de estudio tiene un gran volumen y/o no está tratado con materiales absorbentes, o de estarlo lo es de forma mínima, el nivel de campo reverberante resultará muy alto, ya que el tiempo de reverberación será demasiado elevado, con lo que la distancia crítica D_c será pequeña. Esto determinará que a poco que una persona se aleje de la fuente sonora, se hallará dentro de la zona de campo reverberante, donde la inteligibilidad de la palabra no es buena (Figura 1).

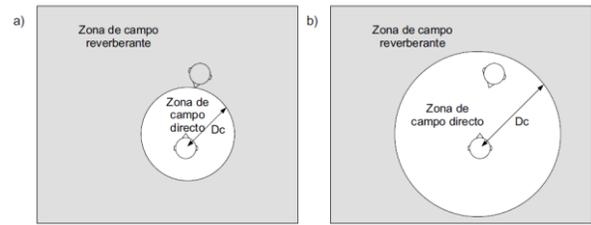


Figura 1. Salas con diferentes grados de acondicionamiento acústico: a) sala poco tratada, el receptor se halla a una distancia superior a la distancia crítica D_c ; b) sala con mayor tratamiento, el receptor se encuentra a una distancia inferior a D_c .

2. MÉTODO DE TRABAJO

2.1. Descripción del método.

Existen diversos métodos para medir el tiempo de reverberación. Las diferencias fundamentales de estos métodos están basadas en la información que se desee obtener, es decir, si se trata de obtener valores globales de discernimiento de una banda de frecuencias en un espectro amplio, o se busca mayor resolución en determinadas frecuencias.

El método de medición con el que se realiza el estudio, es el “impulsivo” que conlleva la utilización de un detonador y un sonómetro con registrador.

Al respecto, si bien en la actualidad existen varios métodos de medición de la respuesta impulsiva de recintos (RIR: Room Impulse Response), no fue hasta el año 1975 cuando se configuró el primer método estándar de medición y se publicó la primera versión de la norma ISO 3382, “Acoustics - Measurement of reverberation time in auditoria”, con mención específica al tiempo de reverberación, concepto introducido por el Prof. Wallace Sabine a principios de 1900.

Tuvieron que transcurrir más de 20 años, hasta que se publicó la segunda versión de la norma, “Acoustics - Measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters” (ISO 3382: 1997), en la que se hace referencia a diferentes métodos de medición, como la interrupción de ruido estacionario o la integración inversa del cuadrado de la RI obtenida a partir de señales de excitación impulsivas (disparos de pistola, ráfagas de ruido, etc.).

La norma ISO 3382 plantea dos métodos; el directo, a través de impulsos producidos por disparos de pistola, etc. y el indirecto, utilizando diferentes señales continuas de excitación y posterior procesamiento digital de las respuestas.

Para llevar a cabo este proyecto, se optó por el método impulsivo, utilizando como detonador globos (objeto origen del impacto) y un sonómetro de tipo 1 sobre trípode



modelo hand-held analyzer type 2250 de la marca Brüel and Kjaer, como el que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. A la derecha del todo el tipo de globos utilizado, en medio el sonómetro fijado por su trípode y a la izquierda el sonómetro utilizado para hacer las mediciones.

En la Figura 3, se muestra el método impulsivo, consistente en hacer explotar el globo en una determinada posición, ubicando el sonómetro fijo en el trípode en otra diferente para medir el tiempo de reverberación de dicho impacto.

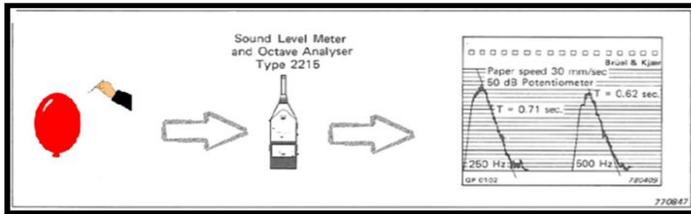


Figura 3. Proceso de medición del tiempo de reverberación a través del método impulsivo.

La recogida de datos se llevó a cabo en la Escuela Politécnica de Ingeniería en Viesques (Gijón), en las aulas 3 y 7 del Departamento de Energía y la 10 del Aulario Sur.

La elección de las aulas citadas se debió a que las aulas 3 y 7 mostraban diferente ubicación del mobiliario de mesas y sillas, y de la misma forma los diseños de dicho equipamiento no eran coincidentes. En cuanto al aula 10 se eligió por su forma escalonada y por ser de mayores dimensiones que las anteriores.

2.2 Procedimiento de medida

El procedimiento de medida empleado en el estudio fue el mismo para las tres aulas.

La primera actuación consistió en activar el sonómetro, previa fijación sobre el trípode, al ser nuestro receptor (aquel que registra los datos o información), ubicándolo

posteriormente en dos posiciones distintas en función del aula, y realizando dos medidas en cada una de ellas.

Para ello, una vez fijado el sonómetro, se procedió a la calibración del instrumento, con el fin de comprobar que las medidas que se realizasen diesen resultados reales, dado que con este sonómetro una vez realizada la citada calibración con el instrumento correspondiente, el nivel de ruido debería darnos 93,8 dB.

En la parte superior de la Fotografía 2, vemos la ubicación del sonómetro y las posiciones en las que se efectuaron las medidas en el aula 3; en la inferior en el aula 10 y en el medio las fotografías correspondientes al aula 7. Los volúmenes resultantes han sido 171,59 m³, 786,75 m³ y 163,28 m³ respectivamente, dato que utilizaremos más adelante.

Como ya hemos dicho anteriormente, la fuente utilizada para producir el impacto ha sido un globo.

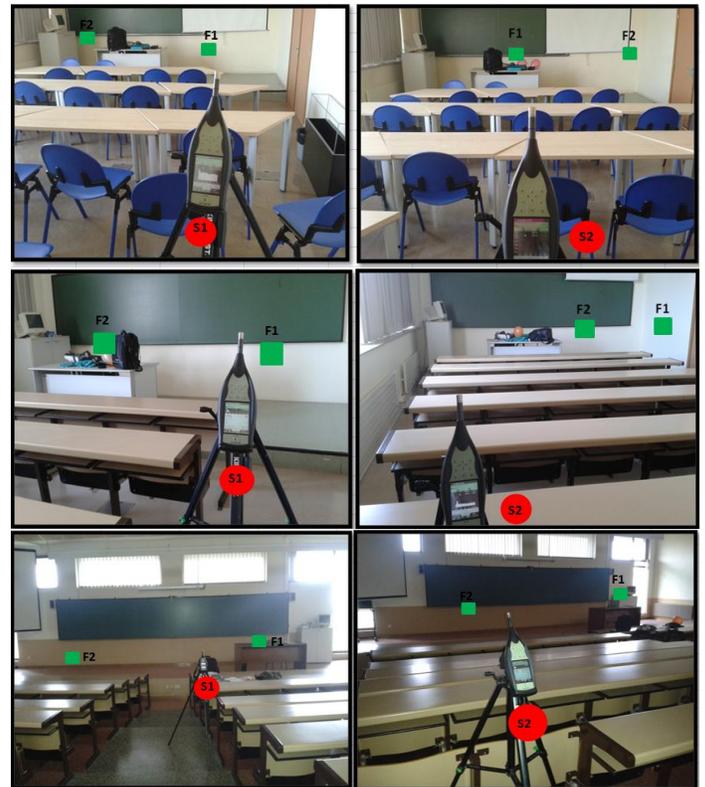


Figura 4. Parte superior posición del sonómetro y de la fuente del aula 3, las fotografías del medio corresponden al aula 7 y las situadas en la parte inferior al aula 10.

Una vez activado el sonómetro, la segunda actuación, siguiendo las instrucciones especificadas en el manual, fue la de llevar a cabo las mediciones del tiempo de reverberación, para lo cual fue preciso previamente configurarlo con el fin de



asegurarnos de que las medidas se estaban realizando con el método adecuado.

Posteriormente, se procedió a realizar un esquema con las posiciones de los receptores y las fuentes para cada posición, para a continuación medir el tiempo de reverberación por el método impulsivo, explotando al efecto un globo en cada posición marcada.

El tiempo de reverberación, ya definido en la introducción, es el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se detiene, hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial, si bien suele medirse el tiempo de decaimiento correspondiente a una caída de 20 o 30 dB y después se extrapola al intervalo de 60 dB.

El sonómetro nos presenta los resultados en forma de gráfico y tabla, además nos dibuja la caída correspondiente a cada una de las frecuencias. Los registros que realiza son principalmente el tiempo de reverberación medio del aula y el correspondiente a una posición en concreto para cada una de las frecuencias comprendidas en el rango que va desde los 100 Hz hasta los 3,15 kHz.

Una vez hallados los tiempos de reverberación para la caída de 20 y 30 dB los extrapola a la de 60 dB. En el caso de que perciba algún error, como un ruido de fondo alto o caída irregular (la caída irregular quiere decir que la diferencia entre la caída de 20dB y la de 30dB supera el 10%) nos lo indicará señalando cada medida errónea con un icono con forma de cara, roja para las medidas con grandes errores y amarilla para las medidas con un error más pequeño.

Nosotros utilizaremos las mediciones medias para una caída de 20dB, ya extrapoladas por el sonómetro a 60 dB y denominadas como T20, que son las que no han mostrado prácticamente ningún error en las respectivas mediciones.

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico de RT, la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine.

Es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de la fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones).
- Geometría regular de la sala.

- Coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$ inferior a, aproximadamente, 0,4.

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera, se representa mediante el llamado coeficiente de absorción α . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material, variando con la frecuencia.

En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción α por su superficie S. La unidad de absorción es el sabín (1 sabín corresponde a la absorción de 1m² 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_{total} como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir :

$$A_{total} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

A partir de A_{total} es posible calcular el coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$ dividiendo la absorción total A_{total} por la superficie total del recinto S_t:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{total}}{S_t}$$

Donde:

S_t= S₁+S₂+...+S_n = Superficie total del recinto (paredes + techo + suelo).

Los recintos estudiados son dos aulas rectangulares y una trapezoidal y cumplen con las características citadas anteriormente, donde todos los $\bar{\alpha}$ son menores de 0,4. Así que, una vez obtenidos los tiempos de reverberación medios para cada frecuencia, hallaremos la absorción de la superficie total mediante dicha fórmula.

Para hallar el coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}$, como bien se indica anteriormente, hay que calcular la absorción total, que obtendremos a partir del tiempo de reverberación corregido. Éste es el que utilizaremos de referencia como el



tiempo de reverberación medio del recinto. Su obtención se consigue realizando la media aritmética entre los tiempos de reverberación de las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz como indica la siguiente fórmula:

$$TR = \frac{T_{500} + T_{1000} + T_{2000}}{3}$$

La correspondiente expresión matemática de Sabine, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire es la siguiente:

$$TR = \frac{0,161 V}{A_{total}} = \frac{0,161 V}{\bar{\alpha} S_t}$$

Donde:

- V= Volumen del recinto en m³.
- A_{total}= Absorción total del recinto.
- $\bar{\alpha}$ = Coeficiente medio de absorción.
- S_t= Superficie total del recinto.

Para evaluar si el tiempo de reverberación en las aulas de estudio responde a los parámetros de confort acústico descritos en el código de edificación técnica, debemos obtener la absorción total para los tiempos de reverberación permitidos por la legislación para aulas vacías que se especifican en el Documento Básico “DB HR Protección frente al Ruido”.

En el apartado 2.2 de este documento “Valores límite del tiempo de reverberación”, se especifica exactamente que “El tiempo de reverberación en aulas y salas de conferencias vacías, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no será mayor que 0,7 s.”

En lo relativo a las aulas y las salas de conferencias cuyo volumen sea mayor que 350 m³, quedan excluidas del ámbito de aplicación del DB HR, para los cuales no son de aplicación las exigencias establecidas en el punto 2.2 del DB HR, y que, por tanto, deben ser objeto de estudio especial en cuanto al diseño acústico de la sala.

En la Tabla 2 vemos los valores recomendados para el tiempo de reverberación para distintos tipos de recintos.

Tiempo de reverberación(*)			
Recinto	Situación	Volumen(m ³)	TR (s)
Aulas y Salas de conferencias	Vacías	< 350	≤ 0,7
	Con butacas	< 350	≤ 0,5
Restaurantes y comedores	Vacíos	-----	≤ 0,9

(*)Obtenido de la media de las bandas de frecuencias de 1/1 octava de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla 2. Valores recomendados del tiempo de reverberación.

En nuestro caso las aulas 3 y 7 tienen volúmenes inferiores de 350 m³, en cambio, el aula 10 tiene un volumen superior a 350 m³ y aunque por ley no se encuentra dentro del ámbito descrito, utilizaremos como guía, el mismo valor límite del tiempo de reverberación especificado en dicho documento.

Por lo tanto, y después de hacer un pequeño hincapié en la legislación, hallamos el valor de la absorción total que necesita el aula (absorción hallada con un tiempo de reverberación de 0,7 s). De la diferencia entre la absorción total para un tiempo de reverberación de 0,7 s, denominada A (0,7), y la absorción obtenida con el tiempo de reverberación corregido perteneciente a nuestras mediciones, A (T20 corregido), obtenemos la absorción equivalente global del aula (A_{eq}). Esta se define como el número de sabines que se debe aumentar la absorción del aula para que cumpla con la legislación pertinente y haya un buen confort acústico y una buena inteligibilidad. Mostrado lo anteriormente descrito en la siguiente ecuación:

$$A(0,7) - A(T20 \text{ corregido}) = A_{eq}$$

Para adecuar el tiempo de reverberación del aula a la legislación es necesario aumentar la absorción de ésta y por lo tanto, deberemos añadir materiales con mayor superficie absorbente. Para ello utilizaremos diversos catálogos de distintas empresas que nos servirán de guía para elegir aquellos materiales que presenten las mejores características de absorción, montaje, economía... Y con un diseño que se pueda integrar en la estructura de las aulas.

En el siguiente apartado discutiremos las mejores opciones para este estudio y valoraremos las distintas alternativas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Datos de partida

En la siguiente tabla podemos ver, como bien se explica anteriormente, que las tres aulas cumplen con los requisitos establecidos, donde el $\bar{\alpha}$ es menor de 0,4.

	AULA 7	AULA 3	AULA 10
S _T (M ²)	198,80	205,34	565,34
TR CORREGIDO (S)	1,19	1,35	1,21
A TOTAL CORREGIDA	22,02	20,26	103,74
Coefficiente de absorción medio ($\bar{\alpha}$)	0,11	0,10	0,18

Tabla 1. Cálculos de la superficie total, absorción total y tiempo de reverberación corregidos y coeficiente de absorción medio para las distintas aulas del estudio.



Los datos principales que se han registrado en el sonómetro, a partir de los cuales calcularemos todos los parámetros descritos en el apartado de metodología, son los tiempos de reverberación medios de la estancia para una caída de 20 dB (T20).

Al medir los tiempos de reverberación en dos posiciones distintas en cada aula, se realizó un promedio entre las dos mediciones para poder simplificar el proceso y tener sólo un tiempo de reverberación medio en cada frecuencia, para cada aula mediante la ecuación:

$$T20_{promedio} = \frac{T20_1 + T20_2}{2}$$

En la siguiente tabla mostramos los datos del tiempo de reverberación ya promediados para las aulas 7, 3 y 10.

T20 _{promedio}			
Frecuencias(Hz)	Aula 7	Aula 3	Aula 10
100	1,28	1,66	1,47
125	1,59	1,49	1,54
160	1,46	1,38	1,42
200	1,32	1,49	1,41
250	1,29	1,45	1,37
315	1,27	1,40	1,34
400	1,21	1,49	1,35
500	1,22	1,35	1,28
630	1,13	1,24	1,18
800	1,17	1,25	1,21
1000	1,09	1,29	1,19
1250	1,22	1,30	1,26
1600	1,22	1,36	1,29
2000	1,26	1,43	1,34
2500	1,20	1,33	1,27
3150	1,14	1,26	1,20

Tabla 3. Promedio de los tiempos de reverberación de cada aula para cada frecuencia.

Siguiendo el procedimiento descrito, y habiendo registrado ya los tiempos de reverberación correspondientes, calculamos la absorción para cada frecuencia en cada una de las aulas, despejándola de la correspondiente fórmula de Sabine y utilizando los tiempos de reverberación promediados hallados anteriormente:

$$TR = \frac{0,161 V}{A_{total}}$$

$$A_{total} = \frac{0,161 V}{TR}$$

En la siguiente tabla se muestran las absorciones en sabines para cada frecuencia de las distintas aulas.

A (T20)			
Frecuencias(Hz)	Aula 7	Aula 3	Aula 10
100	20,41	16,54	85,63
125	16,43	18,43	101,11
160	17,96	19,90	83,92
200	19,79	18,43	91,22
250	20,33	18,94	76,52
315	20,57	19,61	92,56
400	21,68	18,43	98,73
500	21,50	20,34	99,90
630	23,22	22,14	110,42
800	22,42	22,05	103,60
1000	23,97	21,28	107,13
1250	21,41	21,12	104,46
1600	21,50	20,19	104,46
2000	20,82	19,27	104,46
2500	21,77	20,64	108,05
3150	23,02	21,79	102,76

Tabla 4. Absorciones de las diferentes aulas para cada frecuencia.

3.2. Resultados

Como podemos comprobar en los siguientes gráficos, este tiempo de reverberación es superior a 0,7 segundos en todas las frecuencias y no cumple con la legislación correspondiente.

El objetivo de este estudio, es reducir dichos valores para que haya un buen confort acústico en la sala.

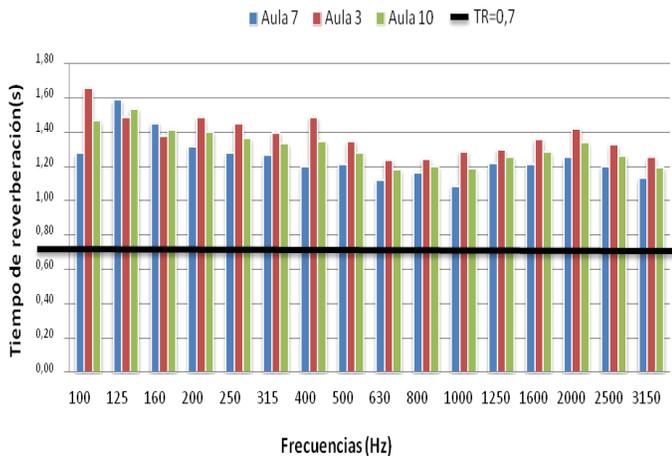


Figura 5. Comparación de los tiempos de reverberación de las aulas con el valor límite establecido.

Para poder comparar de forma sencilla la absorción teórica que se debería tener, $A(0,7)$, y la que se tiene, $A(T20)$, hallamos para cada una de las aulas el tiempo de reverberación corregido, el cual resulta del promedio de las frecuencias representativas 500, 1000 y 2000 Hz.

Con este tiempo hallamos la absorción que tiene cada aula y la comparamos con la de obligado cumplimiento. La diferencia de ambas es la cantidad de absorción que deberemos de añadir, colocando en las aulas diversos materiales y estructuras para conseguirlo y poder contar con un mejor confort acústico.

En la siguiente tabla mostramos el TR corregido en segundos con su absorción correspondiente, la absorción teórica y la diferencia entre ambas en sabines referidas a cada una de las aulas.

	$TR_{\text{corregido}}$	$A(T20)_{\text{corregido}}$	$A(0,7)$	$A(0,7) - A(T20)_{\text{corregido}}$
Aula 3	1,36	20,26	39,22	18,96
Aula 7	1,19	22,02	37,32	15,30
Aula 10	1,21	103,75	179,83	76,08

Tabla 5. Parámetros de absorción de las distintas aulas

Una vez que obtenemos la cantidad de absorción necesaria que debemos añadir a las aulas, el siguiente paso es la elección de diferentes soluciones para conseguirlo. Esto se hace considerando una serie de catálogos de diferentes empresas y comparando las mejores soluciones.

En el siguiente apartado veremos las alternativas que se han barajado por su economía, diseño y sobre todo, mejor absorción acústica.

3.3. Soluciones adoptadas.

Para mejorar el confort acústico de una estancia se utilizan, habitualmente, materiales absorbentes en las superficies (suelo, paredes y techos), si bien en determinados casos no resulta posible, debido a la existencia de ventanas, muebles, luminarias, etc. que dificultan el tratamiento acústico.

Por lo general, inicialmente se suele elegir el tratamiento del techo al ser la mayor superficie libre del local, si bien en caso de estar configurado con un material poco absorbente al sonido, como el hormigón, determinará que el tiempo de reverberación sea elevado, y consecuentemente, para disminuirlo, deberemos recubrirlo.

Como el techo, las paredes representan un porcentaje muy elevado de la superficie de un aula, contribuyendo de este modo y de forma relevante, al tiempo de reverberación final. Si construimos unas paredes con materiales que reflejen el sonido (baldosas, cristales, etc.) elevaremos el tiempo de reverberación. Por otro lado, tampoco podemos recubrirlas con un material absorbente, ya que, en muchos casos, no sería práctico, debido a que estos materiales se ensucian con mayor facilidad y tienen poca resistencia mecánica.

Por este motivo, para llegar al TR deseado, no se acostumbra a tratar acústicamente las paredes con el objetivo de reducir el tiempo de reverberación, sino que se concentrará casi toda la absorción necesaria en el techo.

En nuestro caso, las aulas disponen de un falso techo y nuestro objetivo será buscar aquellas opciones que nos permitan aumentar la absorción en la superficie del techo. Por este motivo hay que tener presente, cuáles son los materiales más adecuados y cómo tenemos que distribuirlos. Con un tratamiento acústico adecuado en el techo, podemos ajustar considerablemente el tiempo de reverberación.

3.3.1. Soluciones para las aulas 3 y 7

Las aulas 3 y 7 son muy similares entre sí, diferenciándose prácticamente en el mobiliario que contienen, por lo que las opciones que se escogieron son válidas para las dos aulas, modificadas únicamente en la cantidad necesaria de materiales debido a su escasa diferencia en el volumen.



OPCIÓN 1: las dos aulas tienen un falso techo, por lo que una de las opciones a considerar es la de añadir placas para aumentar la absorción.

La solución que proponemos se llama «*tratamiento acústico mediante objetos*» y consiste en acondicionar el volumen de la estancia mediante objetos acústicos.

Elegimos las placas *Fractus encastradas*, de la marca STEREO, especialmente concebidas para los falsos techos estándar (T24 y T15). Estas placas se colocan en el interior de la estructura, insertándose bajo las placas existentes mediante un nuevo sistema de fijación ultra-práctico y rápido, y realizándose el montaje, y en su caso el desmontaje, en muy poco tiempo.



Figura 6. Colocación y vista de las placas Fractus encastradas.

El Aula 7 tiene un techo con una superficie de 48,56 m², y el aumento de superficie de absorción que se debe realizar es de 15,30 m². Cada placa de *Fractus encastrada*, tiene una longitud y una altura de 0,575 m y un ancho de 83 mm, por lo que la superficie de la placa es de 0,33 m².

En la memoria descriptiva del catálogo correspondiente de Stereo, nos indica que la absorción de una unidad (una placa) es de 0,49 m², es decir, que cada placa absorbe 0,49 sabines. Como nosotros necesitamos llegar a una absorción de 15,30 m², la cantidad de placas que necesitaremos para conseguir esa absorción son 32 placas, con una superficie de absorción de 15,68 m², suficiente para llegar al confort acústico deseado.

En cuanto al aula 3, utilizamos el mismo procedimiento. Su techo tiene una superficie de 50,98 m² y necesita un aumento de 18,96 m², por lo que se necesitan 39 placas de 0,33 m² para cumplir con la legislación vigente.

En la siguiente tabla vemos los valores de los tiempos de reverberación de cada frecuencia para un distinto número de placas y comprobamos que se cumplen los resultados previstos anteriormente. Esta marca nos da la información de la absorción equivalente directamente, en vez del coeficiente de absorción. Hay que tener especial cuidado en no confundir los dos términos a la hora de hallar el tiempo de reverberación.

Frecuencias	Aeq	Aula 7			Aula 3		
		TR 30	TR 32	TR 33	TR 38	TR 39	TR 40
125	0,11	1,33	1,32	1,31	1,22	1,22	1,21
250	0,39	0,82	0,80	0,79	0,83	0,82	0,81
500	0,48	0,73	0,71	0,70	0,72	0,71	0,70
1000	0,51	0,67	0,65	0,64	0,68	0,67	0,66
2000	0,48	0,75	0,73	0,72	0,74	0,73	0,72
TR corregido		0,72	0,70	0,69	0,71	0,70	0,69
		>0,7	≤ 0,7	< 0,7	>0,7	≤ 0,7	< 0,7

Tabla 6. Valores de los tiempos de reverberación para cada frecuencia de las dos aulas con distinto número de placas.

Cada placa *Fractus encastrada* tiene un valor económico de 177 € por lo que para el aula 7 se invertirán 3744 € y para el aula 3 alrededor de 4563 €.

OPCIÓN 2: Otra de las alternativas, es utilizar el panel *P422 Panel VN en rollo*, un panel de lana mineral de vidrio de la clase Ursa glasswool de la marca URSA, que ofrece el aislamiento térmico necesario para dar cumplimiento al Código Técnico de la Edificación con la mejor calidad, incrementando el aislamiento acústico del elemento constructivo donde se incorpora, permitiendo el cumplimiento del DB HR. Por otro lado, su alto coeficiente de absorción acústica ($\alpha=0,9$), hace que el *Panel VN* sea el indicado cuando se requiere acondicionamiento acústico en el interior de un local.

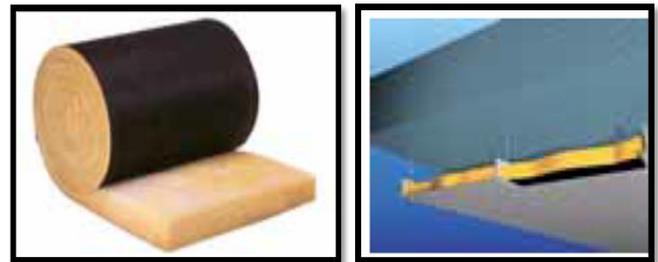


Figura 7. Imagen del Panel VN en rollo y su colocación sobre el techo.

Por lo tanto, siendo su coeficiente de absorción 0,9 y la superficie del rollo 18 m²; tendremos una absorción equivalente de 16,2 m² en cada rollo, suficiente para cubrir los 15,30 m² de superficie de absorción del aula 7, pero insuficiente para cubrir los 18,96 m² del aula 3.

Consecuentemente, para este aula se necesitará un rollo de 18 m² más 4 m² de otro, con lo que tendremos una absorción de 19,8 m². Como cada m² cuesta 4,05 €, para el aula 7 habría un gasto de 72,9 €/rollo. En cambio para el aula 3, al necesitar más cantidad, el gasto será de 89,1€.



OPCIÓN 3: Otra de las alternativas, es colgar paneles suspendidos del techo, para ello utilizamos placas cuadradas de la marca ECOPHON, en particular, las *Ecophon solo square*.

Esta solución acústica es muy adecuada en aquellos casos en los que no se puede instalar un techo de pared a pared. Es una unidad suspendida sin marco que ofrece muchas posibilidades de diseño, con amplia gama de colores y diferentes sistemas de fijación. Los distintos tipos de sistemas de suspensión, ofrecen la oportunidad de crear soluciones en diferentes niveles y formando diferentes pendientes.

En el siguiente gráfico, vemos el área de absorción por unidad equivalente (sabines).

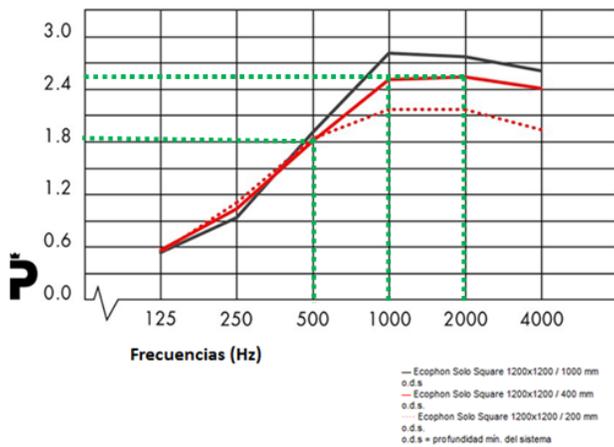


Figura 8. Área de absorción por unidad equivalente de las placas Ecophon solo square.

Si juntamos varias placas con una separación de menos de 0,5 m, la absorción se verá reducida. Como podemos observar, la línea roja es para una separación de 0,4 m entre placas que es la que utilizaremos. La absorción media de las frecuencias representativas 500, 1000 y 2000 Hz es 2,27 sabines.

Se han completado los supuestos de colocar 6, 7 y 8 placas en el aula 7, comprobando que la solución que cumple la condición de $TR \leq 0,7$ es la que supone colocar 7 u 8 placas, descartando automáticamente la de 8 placas, debido a que económicamente el precio será mayor al tener que utilizar más placas.

A continuación se detalla lo explicado anteriormente, incorporando para ello una tabla con los datos y un gráfico para comprobarlo de manera visual.

Frecuencias (Hz)	TR (situación actual)	Aeq	TR 6 placas	TR 7 placas	TR 8 placas
100	1,28	0,52	1,12	1,09	1,07
125	1,59	0,6	1,31	1,27	1,24
160	1,46	0,71	1,18	1,15	1,11
200	1,32	0,84	1,06	1,02	0,99
250	1,29	1	1,00	0,96	0,93
315	1,27	1,21	0,94	0,91	0,87
400	1,21	1,48	0,86	0,82	0,78
500	1,22	1,8	0,81	0,77	0,73
630	1,13	1,98	0,75	0,71	0,67
800	1,17	2,22	0,74	0,69	0,65
1000	1,09	2,5	0,67	0,63	0,60
1250	1,22	2,5	0,72	0,68	0,63
1600	1,22	2,5	0,72	0,67	0,63
2000	1,26	2,5	0,73	0,69	0,64
2500	1,2	2,48	0,72	0,67	0,63
3150	1,14	2,44	0,70	0,66	0,62
TR corregido			0,74	0,70	0,66
			>0,7	≤0,7	<0,7

Tabla 7. Tiempos de reverberación obtenidos para cada frecuencia utilizando 6, 7 y 8 placas.

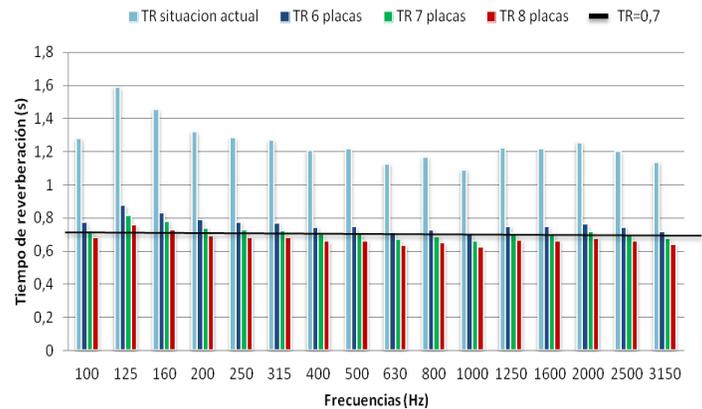


Figura 9. Comprobación visual del resultado de colocar 6, 7 u 8 placas.

Por lo tanto, como cada placa mide 1200x1200x40 mm, para alcanzar la absorción adecuada necesitaremos 7 placas cuadradas que absorberán 15,89 sabines para el aula 7 y 9 placas cuadradas para el aula 3 con una absorción de 20,43 sabines. Se dispondrán como mejor convenga en la estructura de las clases pudiendo regular la altura de unas y otras, utilizándose para su sujeción 4 cables por placa también de la marca Ecophon, denominados *Connect Adjustable wire hanger*.



Figura 10. Ejemplos de salas con solo square y dibujo de la colocación de los cables.

3.3.2. Soluciones para el aula 10

En cuanto al aula de mayor volumen, el aula 10, con 786,75 m³, nos centraremos en los paneles suspendidos, ya que la superficie del techo es mayor y además las lámparas son colgantes, por lo que no habría que encastrarlas dentro de estos paneles y además al tener las paredes mayor superficie, se puede proponer la incorporación de paneles en ellas.

OPCIÓN 1: La primera opción, será utilizar paneles suspendidos *Optima canopy* de la marca ARMSTRONG. .

En esta aula necesitamos un aumento de la superficie de absorción de 76,08 m², por lo que para esta opción vamos a comparar la utilización de diversas formas de paneles suspendidos.

Hemos elegido una forma rectangular, ya que es el diseño que más sonido absorbe con un tamaño de 1170x2390x22 mm, una circular con dimensiones de 1170x22 mm y una cuadrada con un tamaño de 1170x1170x22mm.

Cada panel absorbe 5,25, 2 y 2,45 sabines respectivamente, por lo tanto necesitaremos unos 15 paneles si queremos utilizar la forma rectangular, 39 paneles para la circular y 32 paneles para la cuadrada.

El color y la distribución de ellos en el aula son a elección del cliente teniendo en cuenta que se necesitan accesorios para suspenderlos del techo y que si se quieren agrupar se necesita tener una separación de 51 mm entre ellos.

Haciendo los cálculos pertinentes vemos que todos los paneles caben en la superficie del techo, así que dependiendo del diseño que más convenga en el aula, se optará por uno u otro teniendo en cuenta el factor económico.

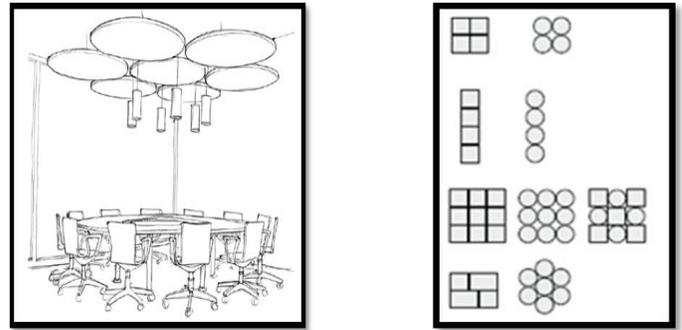


Figura 11. Distintas formas de agrupación de los paneles.

OPCIÓN 2: En esta opción, utilizaremos también paneles suspendidos pero de la marca TEXAA.

Los paneles *rígidos Stereo* de una cara llevan una armadura metálica que garantiza unas formas estrictamente geométricas, y permite una gran variedad de instalaciones. Se suspenden mediante cables verticales u horizontales, o gracias a la nueva suspensión « araña ». Se les puede igualmente atornillar en el techo, cliparlos al muro, o imantarlos a los muebles y a los tabiques metálicos.

La forma cuadrada y la rectangular con dimensiones de 1196x1196x50 mm y 1796x1196x50 mm respectivamente, son las utilizadas en esta alternativa con una suspensión a 300 mm del techo mediante cables verticales.

La superficie de absorción es de 1,87 y 2,41 sabines para cada forma por lo que para aumentar en 76,08 m² nuestra superficie de absorción necesitaremos 41 paneles cuadrados o 32 paneles rectangulares. En este caso también se necesitan accesorios adicionales para poder suspender los paneles del techo.

No podemos realizar una comparación fiable con los paneles de la opción 1 de la marca Armstrong, debido a que tienen superficies y espesores distintos y por lógica cuanto más superficie tenga el panel más absorberá, por eso se necesitan menos paneles en este caso dado que sus dimensiones son mayores.



Figura 12. Distintos diseños de colocación de los paneles rígidos de Stereo.

En el catálogo de los paneles Stereo nos dan información de la absorción equivalente para cada panel de una cara de la forma cuadrada en las distintas frecuencias. En la siguiente tabla comprobamos que, para distinto número de placas, los tiempos de reverberación hallados para cada frecuencia con esta absorción son los correctos.

Frecuencias (Hz)	Aeq	TR 40	TR 41	TR 42
125	0,46	1,06	1,06	1,05
250	1,14	1,04	1,03	1,02
500	1,56	0,78	0,77	0,77
1000	2,13	0,66	0,65	0,64
2000	1,94	0,70	0,69	0,68
TR corregido		0,71	0,70	0,70
		>0,70	≤0,70	≤0,70

Tabla 8. Valores de los tiempos de reverberación por frecuencias para un distinto número de placas.

En cuanto al gasto, cada panel cuadrado son 347 €, mientras que para los rectangulares, invertimos 509 €. Por lo tanto, para un total de 41 paneles cuadrados o 32 rectangulares el gasto ascenderá a 14227 € o 16288 € respectivamente.

OPCIÓN 3: En esa opción, contemplaremos paneles de la marca ECOPHON que se puedan implantar en las paredes como alternativa al techo.

Ecophon Wall Panel A es una buena solución para emplearlo como absorbente de pared, como complemento, o como alternativa al techo para lograr excelentes condiciones acústicas en la sala.

La superficie vista está compuesta por un tejido de fibra de vidrio (denominado Texona), pudiendo elegir entre una gama de colores en función del nivel de reflectancia que se necesite.

En nuestro caso, como el aula 10 tiene un gran volumen, podremos poner paneles en algunos huecos de las paredes. Este tipo de panel tiene un coeficiente de absorción

bastante elevado, $\alpha_w = 0,95$. Teniendo en cuenta que las dimensiones de cada panel son 2700x1200x40 mm, en una superficie de 3,24 m² tendremos una absorción de 3,08 sabines.

Para llegar al valor de una buena absorción, necesitaremos 25 paneles repartidos por cada una de las paredes. Si el cliente quiere profundizar en esta alternativa se tendría que hacer un estudio más detallado y comprobar si estos 25 paneles se podrían fusionar con la estructura de la clase, de tal manera que si no fuese así, se debería combinar esta opción con alguna de las anteriores referidas al techo y valorar el coste económico.



Figura 13. Imágenes e instalación de los paneles Ecophon wall panel A.

En la siguiente tabla mostramos los valores de los tiempos de reverberación para cada frecuencia dependiendo del número de placas que se elijan, en este caso el catálogo nos da los coeficientes de absorción de una placa para cada frecuencia. Comprobamos que, si realizamos los cálculos más detalladamente, el cliente podría colocar incluso una placa menos si el factor que más le interesa es el económico.

Frecuencias (Hz)	TR (situación actual)	α (coef. de absorción)	TR 23 placas	TR 24 placas	TR 25 placas
125	1,25	0,2	1,09	1,09	1,08
250	1,65	0,65	1,01	1,00	0,98
500	1,26	1	0,73	0,71	0,70
1000	1,18	1	0,70	0,69	0,67
2000	1,21	0,95	0,72	0,71	0,70
TR corregido			0,72	0,70	0,69
			>0,7	≤0,7	<0,7

Tabla 9. Valores de los tiempos de reverberación si colocamos distinto número de placas.

4. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se concluye que los tiempos de reverberación en las aulas objeto de valoración, alcanzan un nivel alto en comparación con el límite especificado en el DB HR, siendo probable que dicha circunstancia, venga motivada por no haberse tenido en consideración este valor, en el proyecto de diseño y construcción de la instalación.



Del mismo modo, siendo el techo el elemento que de una manera más directa contribuye de forma notable en la mejora de la acústica de la sala, al representar la mayor superficie libre existente, y teniendo en consideración la existencia de falsos techos en las estancias examinadas que aportan una dificultad añadida a la búsqueda de alternativas, la solución que se plantea, para corregir la deficiencia acústica existente, de forma que su ejecución sea lo más rentable posible sin tener que intervenir ejecutando modificaciones en las aulas, será la utilización de paneles suspendidos ubicados encima de los falsos techos, consiguiendo de esta forma no solo una mayor absorción acústica, sino también un bajo coste de montaje y mantenimiento.

Por último debe añadirse que cada cliente es el responsable de elegir la opción que mejor le convenga, dependiendo del nivel de importancia que le adjudiquen a cada factor, entre los cuales destacan la seguridad, el diseño o el precio de los materiales. No se han podido obtener los precios de todas las opciones debido a la poca disponibilidad de las empresas para dar dicha información.

NOMENCLATURA

D_c (m): Distancia crítica.

T_{20} (s): Mediciones medias del tiempo de reverberación para una caída de 20 dB.

TR; RT(s): Tiempo de reverberación.

α ; α_w : Coeficiente de absorción.

$\bar{\alpha}$: Coeficiente medio de absorción.

A (sabín): Superficie de absorción de un material cualquiera.

A_{total} (sabín): Superficie de absorción total del recinto.

S_t (m^2): Superficie total.

V (m^3): Volumen

$T_{R_{corregido}}$ (s): Promedio del tiempo de reverberación de las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

T_{500} (s): Tiempo de reverberación para una frecuencia de 500 Hz.

T_{1000} (s): Tiempo de reverberación para una frecuencia de 1000 Hz.

T_{2000} (s): Tiempo de reverberación para una frecuencia de 2000 Hz.

A_{eq} (sabín): Absorción equivalente global del aula.

$T_{20_{promedio}}$ (s): Media aritmética del tiempo de reverberación para las dos posiciones donde se realizaron las medidas para una caída de 20 dB.

T_{20_1} (s): Tiempo de reverberación para una caída de 20 dB en la posición 1.

T_{20_2} (s): Tiempo de reverberación para una caída de 20 dB en la posición 2.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a mi tutora Sandra Velarde, por la paciencia que ha tenido para explicarme cualquier duda surgida y a mi padre por ayudarme a redactar correctamente aplicando sus dotes.

REFERENCIAS

[1] Acústica integral S. L. (2009). *Catálogo general guía de materiales y soluciones*.

[2] Armstrong Building Products (2008). *Ficha técnica: Optima canopy*.

[3] Bidondo, A. *Acústica Arquitectónica: El Tiempo de Reverberación*.

[4] Boschi, C. E. (2008). *Método para medir el tiempo de reverberación en recintos*. Laboratorio de Acústica y Sonido "Mario Guillermo Camín" Universidad Tecnológica Nacional . Mendoza. ISSN 1668-7523

[5] BOE (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *BOE 74* (28 marzo 2006): 11816-11831.

[6] Brüel & Kjaer. *Technical documentation: Hand-held analyzers types 2250 and 2270*.

[7] Cantor Cutiva, L.C.; Muñoz Sánchez, A.I. (2009). *Condiciones acústicas de las aulas universitarias en una universidad pública en Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá (Colombia).



- [8] Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1ª ed. Ediciones UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.
- [9] Departamento de Tecnologías Audiovisuales Sección de Acústica de la Escuela Universitaria La Salle (2004). *Estudio para mejorar la insonorización de las aulas*.
- [10] Documento básico HR (2009). *Protección frente al ruido*. Código Técnico de Edificación.
- [11] Ecophon group (2009). *Crear, definir, diferenciar con Ecophon Master Solo S*.
- [12] Hernández López, I. (2010). *Estudio para el acondicionamiento del tiempo de reverberación en salas de reunión*. IT 26/2010.
- [13] Holder Rindel, J. (2012). *Special report: Improving acoustics from the concert hall to the office*. ISO Focus+ Magazine.
- [14] IET (2009). *Guía de aplicación del DB HR protección frente al ruido*. Unidad de calidad en la construcción.
- [15] Isover (2005). *La guía de soluciones de aislamiento*.
- [16] Knauf AMF Sistemas de Techos S.L. (2011). *Sistemas de techos AMF: Espacio de ideas y arquitectura*.
- [17] Lidió Juan, F. (2003) *La reverberación en el acondicionamiento*. Servicio de Acústica de CAAT Valencia.
- [18] Menéndez Rodríguez, V. (2008). *Medidas de aislamiento acústico*. Madrid: García BBM S.L., 2008.
- [19] Molins Polo, X. (2010). *Medición de la absorción sonora en cámara reverberante según la norma UNE-EN ISO 354:2004 (referida por UNE EN 1793-1:1998) de una muestra de pantalla vial antirruído ACUSTIC NATUR*. LGAI Technological Center S.A.
- [20] Ordinola, J. *Comparación de métodos de cálculo para tiempo de reverberación de un subterráneo para uso en refuerzo sonoro*.
- [21] Rockfon (2005). *Cátalogo de productos*.
- [22] Skålevik, M. (2012). *Reverberation Time – the mother of all room acoustical parameters*. Norway: Brekke & Strand,
- [23] Texaa (2008). *Stereo objetos acústicos desmontables y móviles*.
- [24] Vázquez Grueiro, J.A. *Método de medición de los niveles sonoros en el ambiente de trabajo, para la estimación del nivel diario equivalente de los trabajadores (basado en la norma AFNOR francesa de agosto de 1987)*.
- [25] Fuentes electrónicas.
- Inasel tecnología acústica.
<http://www.inasel.com/Acustipedia/Legislacion-y-normativa/Contenido-de-un-estudio-de-acondicionamiento-acustico-de-una-sala.html>
[consulta: 6 de marzo de 2013]
 - Acústica Web , Web personal de David Casadevall - Consultor acústico. Tiempo de reverberación.
<http://www.acusticaweb.com/blog/teoria-acustica/98-tiempo-de-reverberaci.html> [consulta: 22 de marzo de 2013]
 - <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbhr/dbhr/090.html>. [consulta: 10 de abril de 2013]