

08/07/2016

TRABAJO FIN DE GRADO. DEPARTAMENTO DE INSTALACIONES ARQUITECTÓNICAS.  
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA.

# ESTUDIO DE LA REVERBERACIÓN EN LAS AULAS Y ZONAS COMUNES DE LA ETSAV.

**ALUMNO: EDUARDO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

**TUTOR: JESÚS FEIJÓ MUÑOZ**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID



**Universidad de Valladolid**

## **Resumen:**

En el presente trabajo se va a calcular de forma analítica y con mediciones in situ, el tiempo de reverberación de dos aulas y la cafetería de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid.

Se organiza en dos capítulos:

El primero, se inicia con una introducción a la acústica, que permite comprender sus conceptos básicos, y finaliza con una breve descripción y análisis, de la normativa aplicable al cálculo y a la medición in situ del tiempo de reverberación.

En el segundo capítulo, se describen los recintos que van a ser analizados, se exponen los cálculos teóricos que van a ser empleados, incluyendo una nueva propuesta del autor, y se aplican a las aulas y a la cafetería. Posteriormente, se pasan a explicar los ensayos realizados, incluyendo una descripción del equipo de medida y el protocolo seguido para realizarlos. A continuación, se adjunta un breve resumen de cómo configurar los aparatos de medida, los resultados de las mediciones y un análisis crítico de los mismos incluyendo una propuesta de mejora.

Con todo ello se pretende evaluar el acondicionamiento acústico de parte de la Escuela, y explicar su proceso de forma clara y sencilla.

### **Palabras clave**

Español: Acústica, tiempo de reverberación, acondicionamiento acústico, ensayo acústico, inteligibilidad.

Inglés: Acoustics, reverberation time, acoustic conditioning, acoustic testing, intelligibility.

# Índice

I.	CAPÍTULO1. INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA Y NORMATIVA APLICABLE. ....	5
1.1	Introducción .....	6
1.2	Objetivos .....	6
1.3	Fundamentos .....	7
1.3.1	<i>Definición de sonido</i> .....	7
1.3.2	<i>Unidades</i> .....	7
1.3.3	<i>Diferencias entre ruido y sonido</i> .....	7
1.3.4	<i>Generación y propagación del sonido</i> .....	7
1.3.5	<i>Velocidad del sonido</i> .....	7
1.3.6	<i>Frecuencia</i> .....	8
1.3.7	<i>Espectro</i> .....	8
1.3.8	<i>Longitud de onda</i> .....	8
1.3.9	<i>Nivel de presión sonora (SPL)</i> .....	9
1.3.10	<i>Propagación del sonido</i> .....	10
1.3.11	<i>Sonido reflejado</i> .....	10
1.3.12	<i>Eco</i> .....	11
1.3.13	<i>Tiempo de Reverberación</i> .....	11
1.3.14	<i>Valores recomendados del tiempo de reverberación</i> .....	12
1.3.15	<i>Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra</i> .....	13
1.3.16	<i>Absorción sonora</i> .....	13
1.3.17	<i>Sistemas utilizados para mejorar la absorción acústica</i> .....	14
1.3.18	<i>Parámetros de calidad acústica</i> .....	16
1.4	Normativa actual.....	17
1.4.1	<i>CTE-DB-HR</i> .....	17
1.4.2	<i>UNE-EN ISO 3382-2: 2008. Parte2</i> .....	20
II.	CAPÍTULO2. ESTUDIO DE LA REVERBERACIÓN EN AULAS Y CAFETERÍA DE LA ETSAV. ....	23
2.1	Características de los recintos analizados.....	24
2.1.1	<i>Aula B2</i> .....	24
2.1.2	<i>Aula B3</i> .....	26
2.1.3	<i>Cafetería</i> .....	28
2.2	Cálculos teóricos y fichas de cálculo del CTE-DB-HR.....	30

2.2.1	<i>Método de cálculo general</i> .....	30
2.2.2	<i>Explicación del método de cálculo para mobiliario</i> .....	31
2.2.3	<i>Fichas justificativas</i> .....	31
2.3	ENSAYOS RELAIZADOS.....	35
2.3.1	<i>Equipo de medida utilizado</i> .....	35
2.3.2	<i>Protocolo de medida</i> .....	36
2.3.3	<i>Metodología e instrucciones de uso del sonómetro</i> .....	38
2.3.4	<i>Tablas de resultados y gráficas.</i> .....	42
2.3.5	<i>Comentarios de los resultados obtenidos</i> .....	44
2.3.6	<i>Posibles propuestas de mejora</i> .....	46
2.4	Bibliografía .....	48

*I. CAPÍTULO 1.  
INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA Y  
NORMATIVA APLICABLE.*

## **1.1 Introducción:**

La arquitectura se define según la RAE, como el arte de proyectar y construir edificios.

Por tanto, si la entendemos como un arte, se tiene que poder percibir por medio de los sentidos. De igual manera que la pintura se percibe por la vista y la música por el oído, la arquitectura debe dar un paso más y poder ser percibida por los cinco sentidos. Así deberemos buscar que el espectador no sólo contemple la arquitectura, sino que la sienta, que la oiga.

Por lo tanto, convendría aplicar este concepto de sentir y oír la arquitectura no sólo a los proyectos singulares, sino también a los edificios cotidianos tales como las escuelas o viviendas.

En los últimos años, cada vez se tiene más en cuenta el aislamiento acústico en éstos edificios que se construyen o rehabilitan. Quizás, debido a la mayor concienciación por parte de los proyectistas, o incluso por petición de los usuarios, pero muy probablemente sea por la obligación de aplicar la normativa vigente.

Lo que sí que sucede con frecuencia, es que se suele obviar la calidad acústica de los recintos interiores de uso cotidiano, tales como zonas de trabajo, bares y cafeterías, o incluso aulas docentes. Uno de los parámetros más importantes que determina la calidad acústica de los recintos, es el tiempo de reverberación.

En este trabajo, se van a calcular los tiempos de reverberación de varios de los espacios de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid (ETSAV), para comprobar su calidad acústica y proponer mejoras, que permitan a los alumnos de esta escuela percibir por los cinco sentidos el arte de la arquitectura.

Para realizar este trabajo, se cuenta con un equipo de medida formado por una fuente sonora omnidireccional, un amplificador y un sonómetro. Se van a tomar como parámetros de calidad, las exigencias del CTE-DB-HR.

## **1.2 Objetivos:**

El tema que he elegido para la realización de este TFG se titula: Estudio de la reverberación en las aulas y zonas comunes de la ETSAV.

Pretendo evaluar el acondicionamiento acústico de parte de la Escuela, ver si cumplen la normativa, y si no fuese así, proponer soluciones constructivas para su mejora.

He decidido escoger este tema, porque entiendo el TFG, como una oportunidad para ampliar mi formación. Investigando especialmente aquellas materias que no he podido profundizar y considero útiles para ejercer mi futura profesión.

Además deseo que este trabajo pueda servir como ayuda para permitir a los estudiantes de arquitectura y arquitectos, calcular el tiempo de reverberación de los espacios que proyecten. Pudiendo permitirles así, compartir este concepto de sentir y oír la arquitectura. Y qué mejor manera, que estudiarlo e intentar aplicarlo a mi escuela.

## **1.3 Fundamentos:**

### **1.3.1 Definición de sonido:**

El sonido es una perturbación que se propaga a través de un medio material elástico. Esta perturbación puede ser debida a cambios locales de presión "p", velocidad vibratoria "v", o densidad "ρ". Esta onda vibratoria puede ser percibida por el ser humano en frecuencias comprendidas entre 20Hz y 20KHz.

### **1.3.2 Unidades:**

El sonido suele ser descrito como una perturbación de presión, ya que es a esta magnitud a la que responde el oído humano. La unidad más usual es por tanto el Pa = N/m<sup>2</sup> (Pascal = Newton por metro cuadrado).

### **1.3.3 Diferencias entre ruido y sonido:**

Un sonido agradable al oído humano, como puede ser el de un instrumento musical, se considera normalmente música. Por tanto estaríamos entendiendo el sonido como una sensación auditiva subjetiva. Sin embargo ese mismo sonido que resulta agradable en condiciones normales, cuando se desea tranquilidad y pasa a ser molesto, se denominaría ruido. Por lo que podemos definir el ruido como todo sonido indeseado que normalmente interfiere con la señal que se desea percibir. También podríamos definirlo de manera más simple como un sonido no deseado.

### **1.3.4 Generación y propagación del sonido:**

El elemento generador del sonido se denomina fuente sonora (tambor, cuerdas vocales...). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas del aire o medio material adyacente, que a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas.

Dichas partículas no se desplazan con la perturbación, sino que oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

### **1.3.5 Velocidad del sonido:**

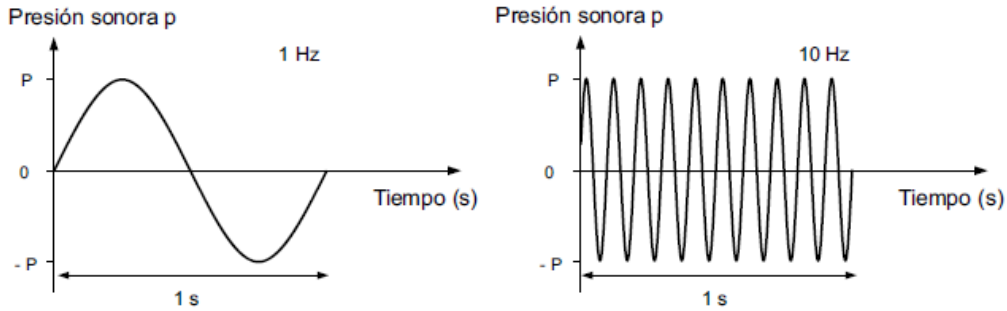
La velocidad de propagación del sonido está en función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica y de la temperatura, resulta que, considerando las condiciones normales de 1atmósfera de presión y 22°C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de aproximadamente 345m/s.

Aunque el aire suele ser el medio habitual de propagación de las ondas sonoras, conviene tener en cuenta que el sonido puede propagarse a través de cualquier otro medio elástico y denso. Cuanto más denso y menos elástico sea el medio, mayor será la velocidad del sonido que discurra por él.

### 1.3.6 Frecuencia:

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora "p" se denomina frecuencia del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo.

En la figura podemos apreciar dos ejemplos de presión sonora asociados a oscilaciones de diferente frecuencia.



### 1.3.7 Espectro:

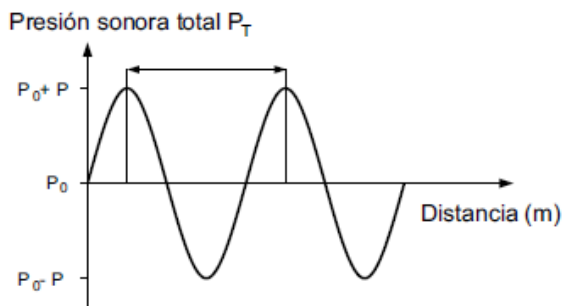
La gran mayoría de los sonidos que percibimos están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando el espectro del mismo, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo forman junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

Un sonido grave está caracterizado por una frecuencia baja, mientras que uno agudo lo está por una frecuencia alta.

En el caso de la audición humana, la banda de frecuencias audibles para una persona joven y sana se extiende, aproximadamente, de 20Hz a 20.000Hz. Las frecuencias inferiores a 20 Hz se llaman subsónicas y las superiores a 20kHz ultrasónicas, dando lugar a los infrasonidos y ultrasonidos.

### 1.3.8 Longitud de onda:

Se puede definir como la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo. También se podría definir de manera más sencilla como la distancia entre dos crestas o como la distancia recorrida por una onda sonora durante un periodo (tiempo en realizar una oscilación completa).



La relación entre las tres magnitudes: frecuencia (f), velocidad de propagación (c) y longitud de onda ( $\lambda$ ), viene dada por la siguiente expresión:  $\lambda = c/f$



**1.3.9 Nivel de presión sonora (SPL):**

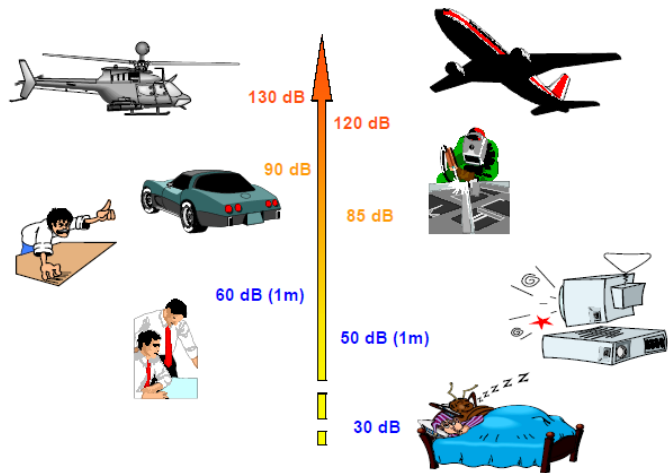
La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/metro<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>) o Pascal (Pa).

La referencia del nivel de presión sonora  $P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  (Pa) se toma a partir del umbral de audición humano a una frecuencia de 1000Hz.

Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica.

La presión sonora depende del punto donde se observe. Para un entorno determinado, el nivel de presión sonora depende de la distancia a la fuente sonora, de la potencia acústica que proviene de dicha fuente y de las características acústicas del entorno. El conocimiento de la potencia acústica emitida por una fuente sonora, permite predecir el nivel de presión sonora en cualquier punto del entorno acústico. El nivel de potencia sonora en dB se calcula como:  
(Donde  $W_{ref} = 10^{-12}$  Watios)

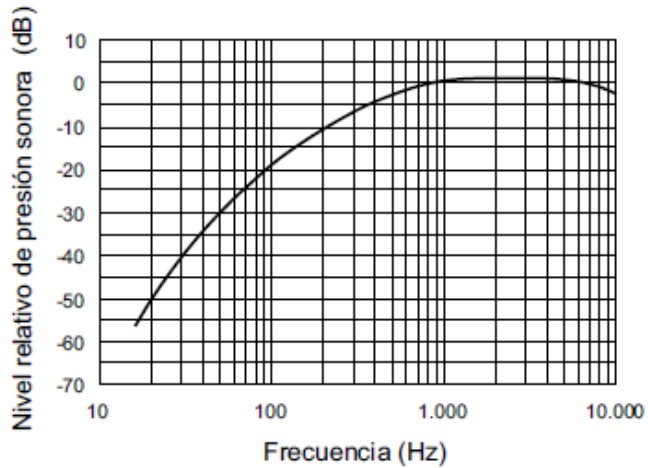
$$L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{W \text{ (vatios)}}{W_{ref}} \right) \text{ (dB)}$$



La figura muestra los valores típicos del nivel de presión sonora para algunos casos habituales.

Se considera que para mantener el sueño sin molestias por ruido, el nivel debe ser inferior a los 35-40 dB. Cuando dos personas mantienen una conversación normal, el nivel de presión sonora medio emitido puede rondar los 60 dB. Para el caso de una persona elevando la voz, se puede medir valores que superan los 80 dB. El ruido de tráfico en una calle de gran circulación puede superar este valor, mientras que en aeropuertos pueden medirse valores de hasta 120 dB.

Para poder reflejar el nivel de presión sonora subjetivo, los equipos de medida suelen tener 4 curvas de ponderación expresadas como leyes: ley A, B, C y D.



La ley A es la más importante por ser la más utilizada puesto que es la que mejor refleja la respuesta del oído humano para niveles habituales de ruido. Se utiliza para determinar el grado de molestia subjetiva que produce un ruido. La figura muestra la ley de ponderación A. Se expresa en dB(A)

### **1.3.10 Propagación del sonido:**

Cuando una fuente sonora situada en un recinto cerrado genera una onda sonora, esta se propaga en todas las direcciones. Un oyente situado en el recinto, recibe dos tipos de sonido: directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia e indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre los paramentos del recinto. El sonido directo es el único que llegaría al oyente si estuviese situado en campo libre.

La energía correspondiente al sonido directo depende de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía correspondiente al sonido reflejado depende de la distancia a la fuente sonora y del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies del recinto.

Por lo general, una fuente sonora se considera omnidireccional, es decir, la fuente radia energía de manera uniforme en todas las direcciones. Es la llamada propagación esférica.

A medida que nos alejamos de la fuente el nivel de presión sonora disminuye a razón de 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente.

Todas las fuentes sonoras no emiten igual, puesto que es fácil que haya factores que perturben su propagación esférica. En el caso de una persona hablando, en ausencia de fenómenos atmosféricos ruidosos, se la puede oír de forma satisfactoria aproximadamente un máximo de 42m en la dirección frontal, 30m lateralmente y 17m en la dirección posterior.

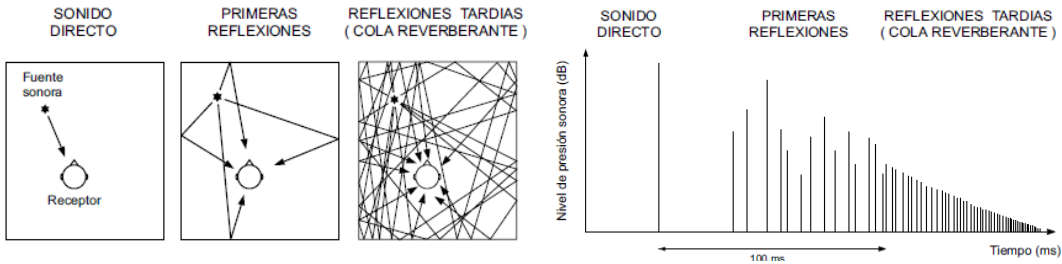
### **1.3.11 Sonido reflejado:**

Al analizar la evolución del sonido reflejado en un punto de un recinto cerrado se observan dos zonas diferenciadas, una zona que engloba todas las reflexiones tempranas (100 ms) que llegan inmediatamente después del sonido directo y unas reflexiones tardías que llegan más tarde y que forman la denominada cola reverberante, (a partir de 100ms hasta la atenuación total del sonido).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora, y en ella el nivel de presión sonora

disminuye 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

Por lo contrario, la zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante, dicho sonido se denomina sonido reverberante. A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona el nivel de presión sonora denominado campo reverberante se mantiene constante.

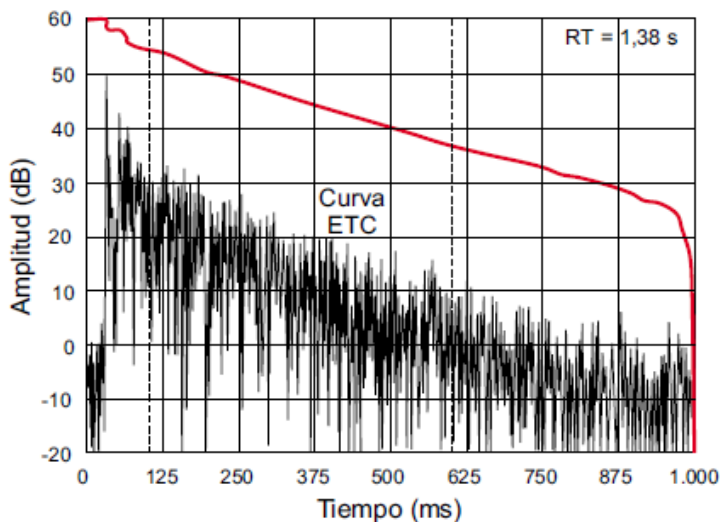


### 1.3.12 Eco:

Todas las reflexiones que recibe un oyente durante los primeros 50ms de la llegada del sonido directo, el oído humano las percibe como sonido directo. En el caso de un mensaje oral, éstas reflexiones contribuyen a mejorar la comprensión del mensaje y producen un aumento de la sonoridad o sensación de amplitud del sonido. Pero a partir de los 50ms todas las reflexiones que percibe el oyente producen un efecto contraproducente a la inteligibilidad del mensaje, porque se entiende como una repetición del sonido directo. Este fenómeno subjetivo de la percepción de una repetición, se denomina Eco. Puede empezarse a notar una cierta repetición, a partir de 50ms pero es mucho más evidente a partir de los 17 metros donde ya se puede considerar el eco debido a un retardo de unos 100ms.

### 1.3.13 Tiempo de Reverberación:

Se define el Tiempo de Reverberación (TR) como el tiempo que transcurre desde que la excitación sonora se detiene, hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial.



El TR es el parámetro más importante que describe la calidad acústica de una sala o un espacio. Es importante para los niveles sonoros, la inteligibilidad de la palabra y la percepción musical. Además, se emplea para corregir los efectos de la reverberación en medidas de aislamiento acústico y de la potencia acústica.

El TR puede oscilar entre unos milisegundos en las cámaras anecoicas, y 10 o más segundos en los grandes espacios o salas.

El tiempo de reverberación depende de lo absorbentes que sean las superficies del recinto. Así, si las paredes son muy reflectoras (es decir que reflejan la mayor parte del sonido que llega a ellas), se necesitarán muchas reflexiones para que se extinga el sonido, y entonces el TR será grande. Si, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta del sonido, por lo tanto en unas pocas reflexiones el sonido será prácticamente inaudible, por lo que TR será pequeño.

Por lo general, el TR varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta, debido en parte, a la mayor absorción de los materiales comúnmente empleados como revestimientos y a la absorción del aire que también aumenta con altas frecuencias.

**1.3.14 Valores recomendados del tiempo de reverberación:**

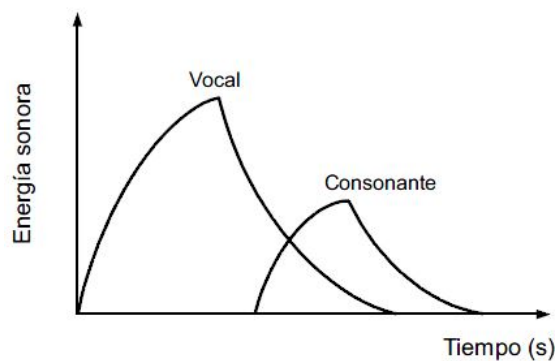
En general, cuando se trata de salas destinadas al habla, es conveniente que los valores de TR sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad. Mientras que en el caso de salas de conciertos, son recomendables unos valores más elevados para que la audición musical resulte óptima. En la tabla se dan los márgenes de valores recomendados de TR medio (TR<sub>mid</sub>. Media del TR para las frecuencias de 500 y 1000Hz), para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

TIPO DE SALA	RT <sub>mid</sub> , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

**1.3.15 Relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad de la palabra:**

Al hablar, la duración de las vocales y su nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes. Además, las vocales están compuestas de frecuencias más bajas, mientras que las consonantes tienen un mayor contenido de frecuencias altas.

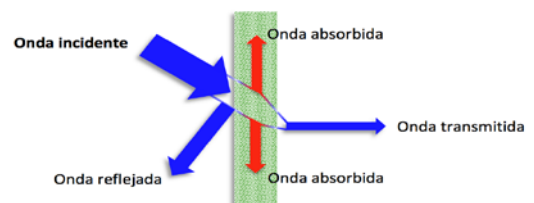
En un recinto con un TR alto, el decaimiento energético de una vocal es más lento que si la vocal se emitiese en el espacio libre, lo que provoca junto con la mayor duración y nivel, que se solapan la vocal con la consonante emitida después. Esto se conoce como enmascaramiento de la consonante y provoca una pérdida de inteligibilidad en el recinto. En la siguiente gráfica se muestra este efecto.



**1.3.16 Absorción sonora:**

En cada reflexión una cantidad del sonido es absorbida por las superficies y otra es reflejada. La cantidad absorbida, en parte, se transforma en minúsculas cantidades de calor y otra parte se propaga a otro recinto contiguo o directamente al exterior.

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera, se representa mediante el llamado coeficiente de absorción  $\alpha$ . 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 (material totalmente reflectante) y 1 (absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. En cuanto a la absorción de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie. La unidad de absorción es el Sabin. En la tabla se muestra la absorción de diversos materiales en función de la frecuencia, (según el catálogo constructivo del CTE).

Acabados de interiores paredes, techos y suelos				
Tipo	HR			
	$\alpha$			$\alpha_m$
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	
Hormigón visto	0,03	0,04	0,04	0,04
Hormigón pintado	0,06	0,07	0,09	0,07
Bloque de hormigón visto	0,05	0,08	0,14	0,09
Bloque de hormigón pintado	0,08	0,09	0,10	0,09
Ladrillo cerámico vistos	0,03	0,04	0,05	0,04
Ladrillo cerámico pintados	0,02	0,02	0,02	0,02
Enfoscado de mortero	0,06	0,08	0,04	0,06
Enlucido de yeso	0,01	0,01	0,02	0,01
Placa de yeso laminado	0,05	0,09	0,07	0,06
Placas de escayola	0,04	0,05	0,05	0,05
Piedra	0,01	0,02	0,02	0,02
Madera y paneles de madera	0,08	0,08	0,08	0,08
Parquet	0,04	0,05	0,05	0,05
Tarima	0,08	0,09	0,10	0,09
Tarima sobre rastreles	0,06	0,05	0,05	0,05
Corcho	0,08	0,19	0,21	0,16
Metales	0,01	0,02	0,02	0,02
Revestimientos textiles	0,09	0,14	0,29	0,17
Moqueta, espesor $\leq 10$ mm	0,06	0,15	0,30	0,17
Moqueta, espesor $\geq 10$ mm	0,15	0,30	0,45	0,30
PVC	0,04	0,05	0,05	0,05
Linóleo	0,03	0,03	0,04	0,03
Caucho	0,04	0,04	0,02	0,03
Terrazo	0,01	0,02	0,02	0,02
Baldosas, plaquetas.	0,01	0,02	0,02	0,02
Vidrio	0,05	0,04	0,03	0,04

### 1.3.17 Sistemas utilizados para mejorar la absorción acústica:

#### -Absorción por porosidad de los materiales.

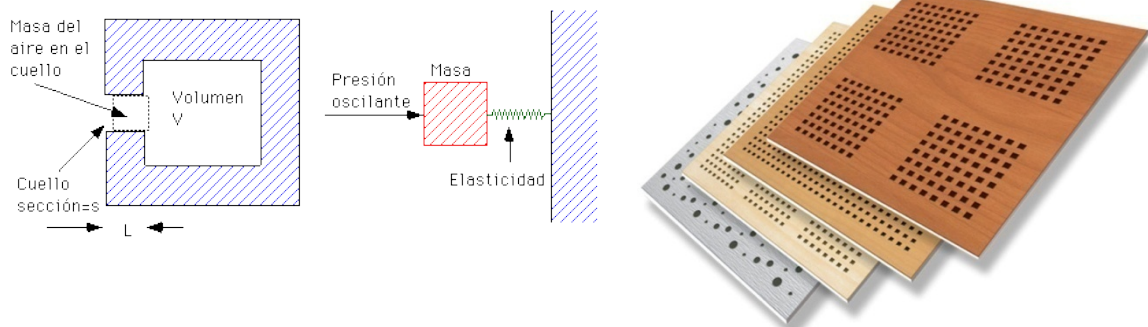
La onda sonora es amortiguada al pasar a través de los materiales absorbentes. El aire contenido en el material proporciona una resistencia a las ondas sonoras que pierden energía en forma de calor por fricción. Algunos ejemplos son materiales textiles, terciopelo, moquetas, espumas, lana mineral, algodón, lana, paneles acústicos. Este tipo de absorbentes es más



efectivo en frecuencias altas a partir de 1000Hz.

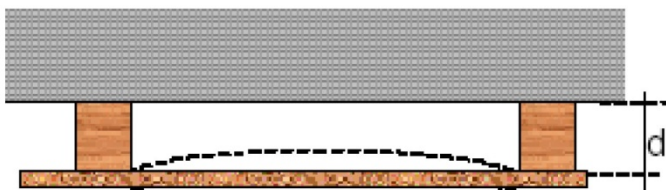
-Absorción por cavidad. Resonadores Helmholtz.

Los resonadores Helmholtz constan de una cavidad de aire con una abertura pequeña en forma de cuello por donde entra la onda sonora. El aire contenido en el cuello, se mueve como un bloque de masa que oscila sobre el aire contenido en el interior de la cavidad, a modo de muelle quitando así energía a la onda acústica. En el caso de los paneles perforados, el aire contenido en los numerosos agujeros del panel oscila delante del volumen de aire encerrado entre el panel y el paramento vertical u horizontal, creando una batería de resonadores. Estos sistemas se sintonizan de manera que se puedan tener distintas frecuencias de resonancia muy cercanas ampliando la banda de absorción. Es efectivo en frecuencias bajas de 125Hz. El absorbente trabaja más o menos como absorbente poroso o una membrana dependiendo de su grado de perforación. La aplicación más común de los resonadores Helmholtz son los falsos techos o paredes construidos con paneles perforados metálicos, de madera, o de yeso.



-Absorción por membrana. Resonadores de membrana.

Un resonador de membrana se compone de paneles continuos de un material elástico con una cámara detrás, rellena de aire o de material absorbente. La absorción se produce con la transformación de la energía sonora en vibraciones: la membrana oscila debido a la onda acústica incidente produciéndose una transformación de energía acústica a energía cinética. La cantidad de energía absorbida depende del movimiento del panel. Este sistema es más efectivo en frecuencias comprendidas entre 40 y 400 Hz, actuando como difusores, con su vibración, en aquellas frecuencias que no absorben.



### **1.3.18 Parámetros de calidad acústica:**

Las características acústicas de un recinto están definidas principalmente por:

- El nivel acústico.
- El tiempo de reverberación.
- La distribución del sonido.
- La inteligibilidad de la palabra. (Indica cómo de bien un orador puede ser entendido por un espectador).

Otros importantes parámetros son la forma del recinto, los materiales elegidos, la disposición de las superficies reflectantes y absorbentes, la fuente sonora y su directividad, reflexión, difusión y absorción, serán los responsables de la calidad final de la distribución del sonido en un recinto. Pero hay que considerar que todos los parámetros están relacionados entre sí.

Además existen una serie de parámetros subjetivos que el oyente desea que tenga una sala como pueden ser:

- Intimidad. (El oyente percibe el sonido como si se encontrara en una sala pequeña, viéndose inmerso en él. Gracias a las reflexiones laterales el oyente se hace una impresión subjetiva de cómo es el espacio.)
- Vivacidad. (Refuerza los sonidos y modifica su duración. Está estrechamente relacionada con el tiempo de reverberación de un recinto y sobre todo, con las frecuencias medias y agudas.)
- Claridad. (El sonido se percibe claro cuando se pueden diferenciar los sonidos sucesivos y los simultáneos. Está muy relacionada con el sonido directo y las primeras reflexiones.)
- Difusión. (Permite explicar porqué el sonido parece provenir de cualquier dirección con igual intensidad. Depende de la reverberación y por tanto, de las superficies del recinto).



## 1.4 Normativa actual:

### 1.4.1 CTE-DB-HR (Articulado: Septiembre 2009, Comentarios: Junio 2015)

#### Ámbito de aplicación:

En el presente trabajo, una de las aulas (B2), y la cafetería que van a ser objeto de estudio, tienen un volumen superior a  $350\text{m}^3$  por lo que no se registrarán por el CTE-DB-HR. Serán objeto de un estudio especial para el acondicionamiento acústico. Además como se trata de un edificio existente si se realizasen obras de rehabilitación o reforma con carácter puntual en cualquiera de los espacios tampoco sería necesario cumplir el CTE-DB-HR.

A pesar de ello, dado que el propósito éste trabajo es comprobar los tiempos de reverberación de las aulas y zonas comunes de la ETSAV, y no proyectar éstos espacios o rehabilitarlos, se van a tomar como referencia los métodos de cálculo y requisitos del CTE-DB-HR. Aprovechando estas circunstancias, y dado que se van a calcular los tiempos de reverberación analíticamente y posteriormente van a ser comprobados con mediciones in situ, servirá para comprobar la precisión de los métodos de cálculo propuestos por el CTE-DB-HR y su posible extrapolación a aulas de mayor volumen que el límite fijado de  $350\text{m}^3$ .

#### Cita del CTE-DB-HR

[El ámbito de aplicación de este DB es el que se establece con carácter general para el CTE en su artículo 2 (Parte I) exceptuándose los casos que se indican a continuación:

- a) los *recintos ruidosos*, que se registrarán por su reglamentación específica.
- b) los *recintos* y edificios de pública concurrencia destinados a espectáculos, tales como auditorios, salas de música, teatros, cines, etc., que serán objeto de estudio especial en cuanto a su diseño para el acondicionamiento acústico, y se considerarán *recintos de actividad* respecto a las unidades de uso colindantes a efectos de aislamiento acústico;
- c) las aulas y las salas de conferencias cuyo volumen sea mayor que  $350\text{m}^3$ , que serán objeto de un estudio especial en cuanto a su diseño para el acondicionamiento acústico, y se considerarán *recintos protegidos* respecto de otros *recintos* y del exterior a efectos de aislamiento acústico.
- 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.]

#### Caracterización y cuantificación de las exigencias:

A continuación se muestra una tabla resumen, de los tiempos límite de reverberación que se van a tomar de referencia para verificar la calidad acústica de los diferentes espacios. Hay que tener en cuenta que al tratarse de un aula y una cafetería con un volumen mayor de  $350\text{m}^3$  el tiempo de reverberación asumible podría ser algo mayor, pero como simplificación se tomarán de referencia los siguientes valores:

VALORES LÍMITE TIEMPO DE REVERBERACIÓN	
Recinto	Tiempo de reverberación
Aulas y salas de conferencias vacías	$T \leq 0,7$ s
Aulas y salas de conferencias con butacas fijas	 $T \leq 0,5$ s
Comedores	 $T \leq 0,9$ s

### Cita del CTE-DB-HR

#### [(2.2 Valores límite de tiempo de reverberación)

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:

- El *tiempo de reverberación* en aulas y salas de conferencias vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor que 350 m<sup>3</sup>, no será mayor que 0,7 s.
- 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 m<sup>3</sup>, no será mayor que 0,5 s.
- El *tiempo de reverberación* en restaurantes y comedores vacíos no será mayor que 0,9 s.

[El DB HR no regula ni los criterios, ni los procedimientos para el diseño acústico de recintos destinados a espectáculos, ni de aulas y salas de conferencias de volúmenes mayores que 350m<sup>3</sup>. Sin embargo, si uno de estos recintos fuera colindante con un recinto protegido o habitable de una unidad de uso diferente, deben cumplirse los valores límite de aislamiento acústico especificados en el apartado 2.1 del DB HR. (Apartados 2.0 de la Guía de Aplicación del DB HR Protección frente al ruido)]

### Diseño y dimensionado :

Para satisfacer los valores límite del Tiempo de Reverberación requeridos por el CTE-DB-HR en aulas, restaurantes y comedores, el CTE-DB-HR propone dos métodos de cálculo:

-Método de cálculo general del Tiempo de Reverberación. A partir del volumen y de la absorción acústica de cada uno de los recintos.

-Método de cálculo simplificado de Tiempo de Reverberación. (Tratamientos absorbentes de los paramentos, del techo y adicionales al techo.) Consiste en emplear un tratamiento absorbente acústico aplicado en el techo.

Dado que el método simplificado sólo es válido para aulas de volumen hasta 350 m<sup>3</sup>, restaurantes y comedores, se va a elegir el método de cálculo general. Este método es una aplicación directa de la ecuación de Sabine a la que se aplican ciertos coeficientes para introducir la absorción acústica de cada paramento, el mobiliario existente y el aire contenido. Esta ecuación se aplica para un coeficiente de absorción acústico medio ( $\alpha_m$ ) <0,2.

Para calcular el área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo y otros elementos móviles de gran tamaño, (en el caso de las aulas de la ETSAV son pupitres corridos de contrachapado con asientos abatibles, mesas y pizarras), al no tener datos fiables de dicho mobiliario, se va a utilizar un método de cálculo investigado y creado por el autor de éste trabajo. Debido a la imposibilidad de disponer de una cámara reverberante para realizar las

oportunas mediciones conforme a la normativa. (UNE EN ISO 354: 2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354: 2003). )  
Se expondrán en su apartado, de forma más detallada dichos métodos de cálculo.

### Cita del CTE-DB-HR

## [3.2 Tiempo de reverberación y absorción acústica

### 3.2.1 Datos previos y procedimiento

1 Para satisfacer los valores límite del tiempo de reverberación requeridos en aulas y salas de conferencias de volumen hasta 350 m<sup>3</sup>, restaurantes y comedores, puede elegirse uno de los dos métodos que figuran a continuación:

- a) el método de cálculo general del tiempo de reverberación a partir del volumen y de la absorción acústica de cada uno de los recintos del apartado 3.2.2.
- b) el método de cálculo simplificado del tiempo de reverberación, apartado 3.2.3, que consiste en emplear un tratamiento absorbente acústico aplicado en el techo. Este método sólo es válido en el caso de aulas de volumen hasta 350 m<sup>3</sup>, restaurantes y comedores.

2 En el caso de aulas y salas de conferencias, ambas opciones son aplicables si los recintos son de formas prismáticas rectas o asimilables.

[El método de cálculo propuesto por el DB HR es aplicable sólo a aulas y salas de conferencias con formas prismáticas rectas o asimilables. En el caso de recintos con formas abovedadas, el método no garantiza un confort acústico, ya que pueden producirse focalizaciones de sonido. En estos casos sería necesario un estudio específico que garantice las condiciones acústicas del recinto.]

3 Debe calcularse la absorción acústica, A, de las zonas comunes, como se indica en la expresión 3.26 del apartado 3.2.2.

4 Para calcular el tiempo de reverberación y la absorción acústica, deben utilizarse los valores del coeficiente de absorción acústica medio,  $\alpha_m$ , de los acabados superficiales, de los revestimientos y de los elementos constructivos utilizados y el área de absorción acústica equivalente medio,  $A_{O,m}$ , de cada mueble fijo, obtenidos mediante mediciones en laboratorio según los procedimientos indicados en la normativa correspondiente contenida en el Anejo C o mediante tabulaciones incluidas en el Catálogo de Elementos Constructivos u otros Documentos Reconocidos del CTE.

En caso de no disponer de valores del coeficiente de absorción acústica medio  $\alpha_m$  de productos, podrán utilizarse los valores del coeficiente de absorción acústica ponderado,  $\alpha_w$  de acabados superficiales, de los revestimientos y de los elementos constructivos de los recintos.

[El coeficiente  $\alpha_w$ , que es el coeficiente de absorción acústica ponderado según la UNE EN ISO 11654 y es un valor que la mayoría de fabricantes de productos para acondicionamiento acústico suministra. Puede utilizarse este valor en caso de no disponer de los valores del coeficiente de absorción medio,  $\alpha_m$ , para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.]

5 Debe diseñarse y dimensionarse, como mínimo, un caso de cada recinto que sea diferente en forma, tamaño y elementos constructivos.

6 Independientemente de lo especificado en este apartado, en el **Anejo J** se incluyen una serie de recomendaciones de diseño para aulas y salas de conferencias.]

### Cita del CTE-DB-HR

## [Anejo C. Normas de referencia.

UNE EN ISO 354: 2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354: 2003)]

**Cita del CTE-DB-HR**

**[Anejo J. Recomendaciones de diseño acústico para aulas y salas de conferencias**

1 En el caso de aulas y salas de conferencias de volumen hasta 350 m<sup>3</sup>, las siguientes recomendaciones sobre la geometría de los recintos y la distribución de los materiales absorbentes tienen por objeto mejorar la inteligibilidad de la palabra.

2 Deben evitarse los recintos cúbicos o con proporciones entre lados que sean números enteros.

3 En cuanto a la distribución de los materiales absorbentes, se recomienda una de las dos opciones de diseño siguientes (Véase figura J.1):

a) opción 1. Se dispondrá un material absorbente acústico en toda la superficie del techo, la pared frontal será reflectante y la pared trasera será absorbente acústica para minimizar los ecos tardíos;

b) opción 2. Se dispondrá un material absorbente acústico en el techo, pero sólo se 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 en la pared trasera se dispondrá un material absorbente acústico de coeficiente de absorción acústica similar al del techo.

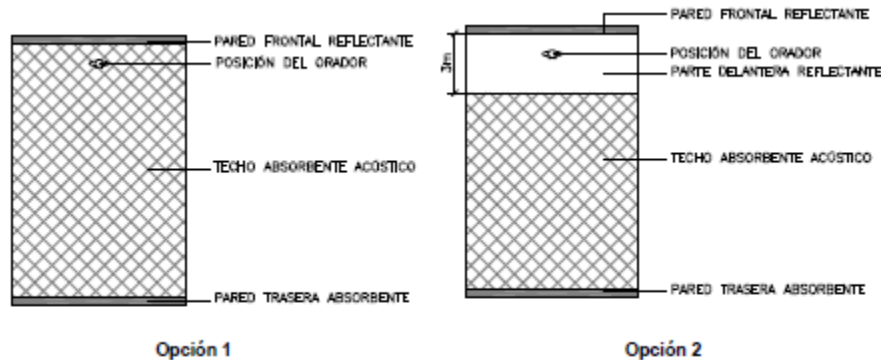


Figura J.1. Vista en planta de las opciones 1 y 2

4 Para valores iguales de absorción acústica total de los elementos que componen el recinto, es más recomendable disponer un pasillo central que dos pasillos laterales para el acceso de alumnos.]

**1.4.2 UNE-EN ISO 3382-2: 2008. Parte2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.**

Para la explicación y justificación de aplicación de esta norma se va a realizar un resumen dado que no está permitido publicar o reproducir su contenido.

**Objeto y campo de aplicación:**

Esta norma describe el procedimiento de medición, el equipo necesario, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo. Los resultados de la medición se pueden utilizar para la comparación con los requisitos del tiempo de reverberación en los recintos.

**Posiciones de medición:**

La norma determina las posiciones de medición necesarias en función del método de medición que utilicemos. En este caso bastará con el método de ingeniería puesto que es adecuado para determinar el tiempo de reverberación y la absorción del recinto. En la siguiente tabla se indican los números mínimos de posiciones de medición.



	Control	Ingeniería <sup>a</sup>	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente <sup>b</sup>	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono <sup>c</sup>	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3

Se elegirán 2 posiciones para la fuente sonora, y 3 posiciones para el micrófono, resultando 6 combinaciones fuente-micrófono. Las posiciones de la fuente se determinan en función del uso del recinto, en el caso de las aulas se colocará sobre la tarima, coincidiendo con la posición del orador, y en el caso de la cafetería se situará centrada en el espacio.

Las posiciones del micrófono deben estar separadas una distancia mínima de 2m. La distancia entre el micrófono y una superficie reflectante como el suelo debe de ser al menos de 1m. No se debe colocar el micrófono muy próximo a la fuente para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo.

**Procedimientos de medición:**

La norma plantea dos métodos para determinar el tiempo de reverberación:

- Método del ruido interrumpido
- Método de excitación de respuesta impulsiva integrada.

El método de excitación de respuesta impulsiva integrada es más sencillo de realizar pero menos preciso, puesto que es más complicado de controlar el rango de frecuencias que se emiten. Basta con generar una respuesta impulsiva, con un método válido como puede ser un disparo, una salva de ruido, un chispazo, explosión de un globo, etc. El sonómetro recoge e interpreta el sonido directo y reflejado, consiguiendo determinar el tiempo de reverberación para cada una de las bandas de octava o de tercio de octava.

Ya que se dispone del equipo para medir el tiempo de reverberación mediante el método del ruido interrumpido, será éste el que se empleará para determinar el tiempo de reverberación. El método consiste en generar un ruido eléctrico de banda ancha aleatoria, con una fuente omnidireccional capaz de producir un nivel de presión sonora suficiente para garantizar una curva de decrecimiento, que empiece 35 dB por encima del ruido de fondo. Si se mide en T<sub>30</sub> será necesario al menos 45dB. La duración de la excitación del recinto debe de ser al menos de TR/2 segundos.

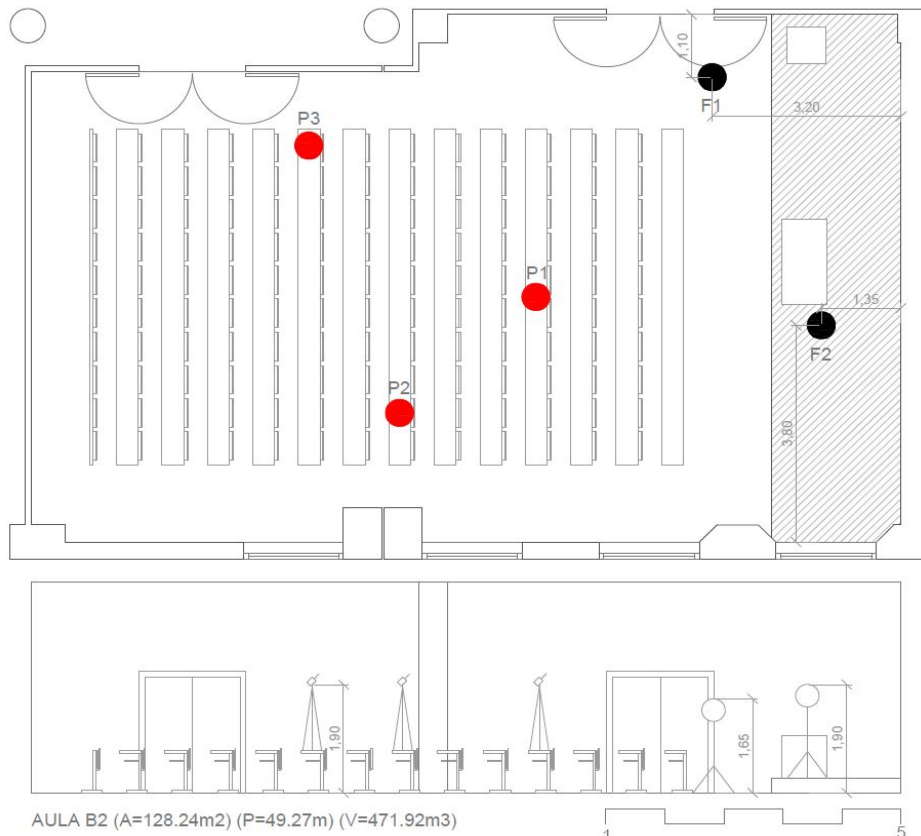
Posteriormente el ruido es recibido por el sonómetro que analiza la señal y determina la curva de decrecimiento para cada una de las frecuencias centrales de las bandas de octava, permitiéndole así calcular el tiempo de reverberación para cada una de esas frecuencias.

*II. CAPÍTULO 2.*  
*ESTUDIO DE LA REVERBERACIÓN EN*  
*AULAS Y CAFETERÍA DE LA ETSAV.*

## 2.1 Características de los recintos analizados.

### 2.1.1 Aula B2

El aula B2, situada en la planta baja, es un recinto cerrado de base aproximadamente rectangular y geometría asimilable a un paralelepípedo rectangular. Tiene un área de  $128.24\text{m}^2$ , un perímetro de  $49.27\text{m}$ , una altura de  $3.68\text{m}$  y un volumen de  $417.92\text{m}^3$ . El acabado de los paramentos es un guarnecido y enlucido de yeso pintado con pintura plástica. La estructura de los forjados superior e inferior, es de losa maciza de hormigón. El acabado del techo está formado por un falso techo de escayola pintada con pintura al temple, sujeto con esparto al forjado superior. La cámara del falso techo es utilizada para el paso de instalaciones y como retorno por plenum del sistema de climatización. El acabado del suelo es de baldosas de terrazo y una tarima elevada de madera para el profesor. Las ventanas están formadas por vidrio doble montado sobre carpintería metálica de aluminio anodizado. Las puertas están formadas por tableros huecos chapados de madera y marcos también de madera. Además tiene unas ventanas para iluminar el distribuidor central formadas por vidrio translucido simple montado sobre carpintería metálica de aluminio lacado. El mobiliario del aula está compuesto por trece pupitres corridos con diez asientos plegables cada uno de madera contrachapada acabada en melamina, una pizarra vinílica, un pantalla para el proyector y unas cortinas de algodón. Sobre la tarima hay una mesa de tablero aglomerado acabado en melamina y un armario para el ordenador también de melamina. Las superficies de cada elemento están recogidas en la hoja de cálculo correspondiente. A continuación se muestra la planta y el alzado del aula donde se reflejan las posiciones y alturas del sonómetro "P" y de la fuente "F".







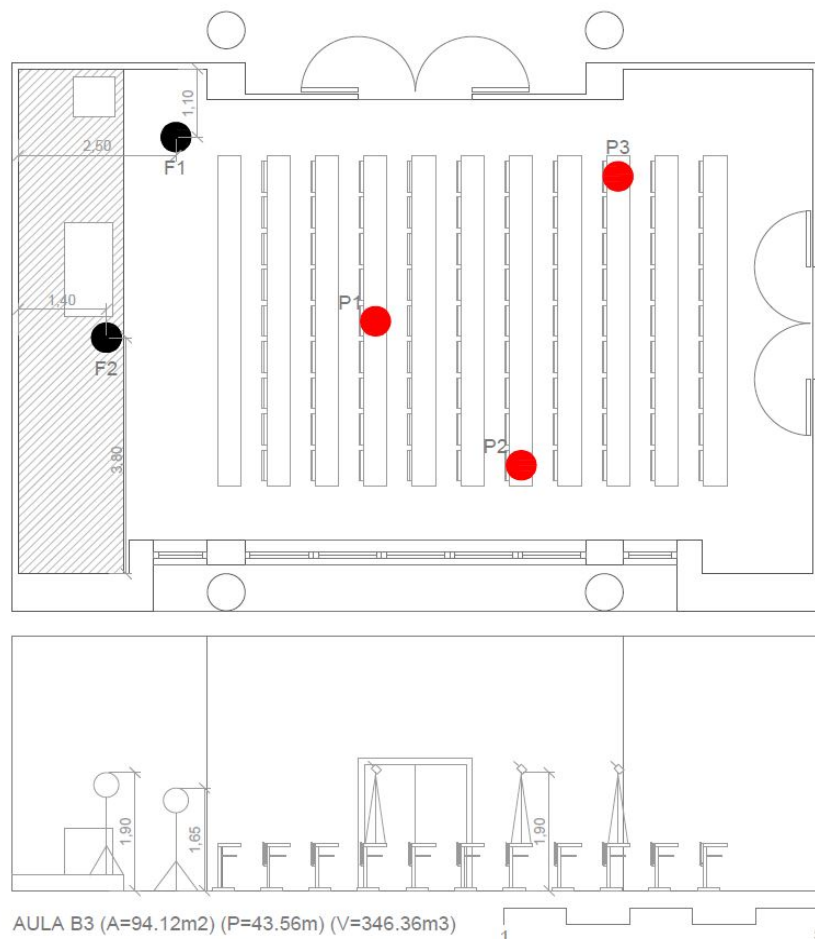
Vista aula B2



Vista aula B2

### 2.1.2 Aula B3

El aula B3, situada en la planta baja, es un recinto cerrado de base aproximadamente rectangular y geometría asimilable a un paralelepípedo rectangular. Tiene un área de  $94.12\text{m}^2$ , un perímetro de  $43.56\text{m}$ , una altura de  $3.68\text{m}$  y un volumen de  $346.36\text{m}^3$ . El acabado de los paramentos es un guarnecido y enlucido de yeso pintado con pintura plástica. La estructura de los forjados superior e inferior es de losa maciza de hormigón. El acabado del techo está formado por un falso techo de escayola pintada con pintura al temple, sujeto con esparto al forjado superior. La cámara del falso techo es utilizada para el paso de instalaciones y como retorno por plenum del sistema de climatización. El acabado del suelo es de baldosas de terrazo y una tarima elevada de madera para el profesor. Las ventanas están formadas por vidrio doble montado sobre carpintería metálica de aluminio anodizado. Las puertas están formadas por tableros huecos chapados de madera y marcos también de madera. Además tiene unas ventanas para iluminar el distribuidor central formadas por vidrio translucido simple montado sobre carpintería metálica de aluminio lacado. El mobiliario del aula está compuesto por once pupitres corridos con nueve asientos plegables cada uno de madera contrachapada acabada en melamina, una pizarra vinílica, un pantalla para el proyector y unas cortinas de algodón. Sobre la tarima hay una mesa de tablero aglomerado acabado en melamina y un armario para el ordenador también de melamina. Las superficies de cada elemento están recogidas en la hoja de cálculo correspondiente. A continuación se muestra la planta y el alzado del aula donde se reflejan las posiciones y alturas del sonómetro "P" y de la fuente "F".





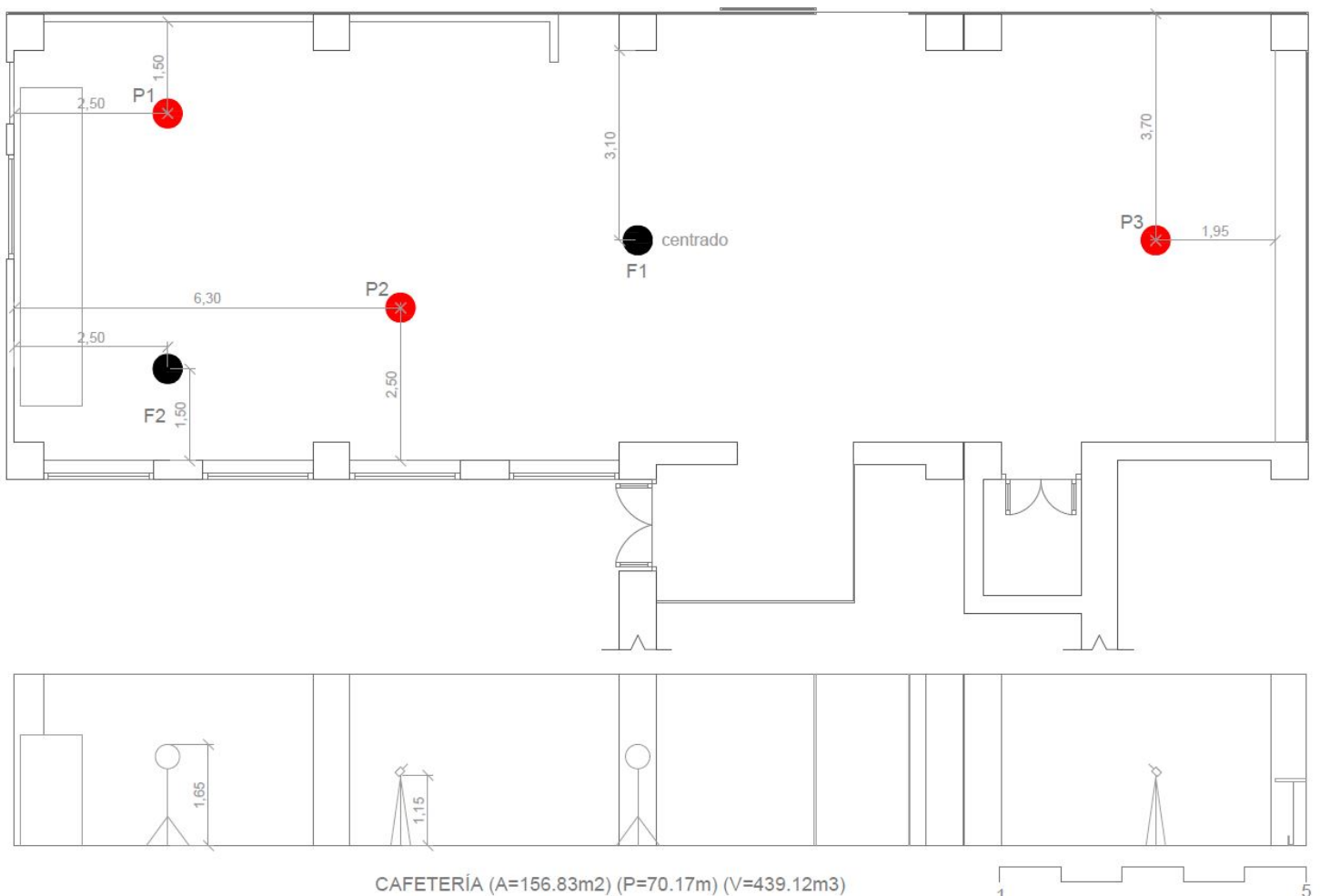
Vista aula B3



Vista aula B3

### 2.1.3 Cafetería

El recinto de la cafetería de la ETSAV, situado en la planta semisótano, es un recinto cerrado de base aproximadamente rectangular, con pilares que sobresalen del paramento y con un apéndice adosado. Tiene un área de  $156.83\text{m}^2$ , un perímetro de  $70.17\text{m}$ , una altura de  $2.8\text{m}$  y un volumen de  $439.12\text{m}^3$ . El acabado de los paramentos es en algunas zonas un guarnecido y enlucido de yeso pintado con pintura plástica azul, en otras mamparas de vidrio con perfilería de acero, y en el apéndice hay unas puertas de chapa metálica pintada. La estructura de los forjados superior e inferior es de losa maciza de hormigón. El acabado del techo es un guarnecido y enlucido de yeso pintado con pintura plástica azul. El acabado del suelo es de baldosas de terrazo. Las ventanas y puertas al exterior están formadas por vidrio doble montado sobre carpintería metálica de aluminio anodizado. Las puertas interiores están formadas por perfilería de acero y vidrio. El mobiliario de la cafetería fue retirado para hacer las mediciones a excepción de una barra de bar de acero inoxidable adosada a la mampara de vidrio, y de unas máquinas expendedoras. Las superficies de cada elemento están recogidas en la hoja de cálculo correspondiente. A continuación se muestra la planta y el alzado de la cafetería, donde se reflejan las posiciones y alturas del sonómetro "P" y de la fuente "F".





Vista de la cafetería sin mobiliario.



Vista de la cafetería sin mobiliario.

## 2.2 Cálculos teóricos y fichas de cálculo del CTE-DB-HR

### 2.2.1 Método de cálculo general:

Para satisfacer los valores límite del Tiempo de Reverberación requeridos por el CTE-DB-HR en aulas, restaurantes y comedores, se ha elegido el **Método de cálculo general**, uno de los dos métodos que contempla el CTE-DB-HR. Este método es una aplicación directa de la ecuación de Sabine a la que se aplican ciertos coeficientes para introducir la absorción acústica de cada paramento, el mobiliario existente y el aire contenido. Esta ecuación se aplica para un coeficiente de absorción acústico medio ( $\alpha_m$ )  $< 0,2$ . Esto es debido, a que se sabe que comete un error significativo para valores mayores. En ese caso se aplicaría la ecuación de Eyring o para valores de absorción muy distintos, se aplicaría la de Millington. En el caso de las aulas, las cortinas tienen un coeficiente de absorción estimado superior a 0,2 pero debido a la que es una superficie pequeña y el error resultante es leve, se aplicará igualmente el Método de cálculo general que establece el CTE-DB-HR.

A continuación se cita el apartado 3.2.2 del CTE-DB-HR donde se explica este método de cálculo.

#### **Método de cálculo general del tiempo de reverberación**

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

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad [\text{s}] \quad (3.25)$$

siendo

$V$  volumen del recinto,  $[\text{m}^3]$ ;

$A$  absorción acústica total del recinto,  $[\text{m}^2]$ ;

La absorción acústica,  $A$ , se calculará a partir de la expresión:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{o,m,j} + 4 \cdot \overline{m}_m \cdot V \quad (3.26)$$

siendo

$\alpha_{m,i}$  coeficiente de absorción acústica medio de cada 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  $\alpha_i$ ,  $[\text{m}^2]$ ;

$A_{o,m,j}$  área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente  $[\text{m}^2]$ ;

$V$  volumen del recinto,  $[\text{m}^3]$ .

$\overline{m}_m$  coeficiente de absorción acústica medio en el aire, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz y de valor  $0,006 \text{ m}^{-1}$ .

El término  $4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$  es despreciable en los recintos de volumen menor que  $250 \text{ m}^3$ .

Para calcular el área de absorción acústica equivalente media ( $A_{o,m}$ ) de cada mueble fijo y otros elementos móviles de gran tamaño, al no tener datos fiables se ha utilizado un **método de cálculo propio**, debido a la imposibilidad de desplazarlos y de disponer de una cámara reverberante para realizar las oportunas mediciones conforme a la normativa. (UNE EN ISO 354: 2004)

### **2.2.2 Explicación del método de cálculo para mobiliario:**

El método de cálculo propio que se ha investigado y empleado para determinar el área de absorción acústica equivalente de cada mueble, se basa en un razonamiento lógico, en el que se considera que los materiales con los que están fabricados los muebles son porosos y que por tanto el mecanismo de absorción es resistivo, pudiendo desprejiciar su comportamiento reactivo. Según esta suposición, sería posible considerar que la superficie de los muebles pasa a ser un elemento más, que se añade a la superficie del cerramiento del recinto a estudiar.

Para poder contemplar en el cálculo, el valor unitario de cada uno de los muebles, se multiplica cada coeficiente de absorción acústica de cada material " $\alpha$ " en la frecuencia que se desee, por la superficie de dicho material. Resultando así, una teórica área de absorción acústica equivalente del mueble " $A_0$ " en cada una de las frecuencias estudiadas de cada uno de los materiales que lo forman. Posteriormente se promedia el valor obtenido en cada una de las frecuencias estudiadas hallando el área de absorción acústica equivalente media " $A_{0m}$ " del mueble u objeto. Finalmente, se multiplica el valor obtenido por el número de muebles iguales que contenga el recinto, consiguiendo así, la absorción acústica teórica de esa serie de muebles ( $A_0 \cdot N$ ). (Se puede consultar algún ejemplo aplicado en las fichas adjuntas.)

Este método permite conocer la absorción acústica teórica de casi cualquier tipo de mueble, conociendo el coeficiente de absorción acústica equivalente de los materiales que lo forman y su área. Eso sí, siempre y cuando su morfología y sus materiales puedan asimilarse a un comportamiento resistivo y no reactivo. Además habría que tener en cuenta que el mobiliario no tiene que estar próximo a superficies reflectantes, puesto que si no, probablemente se vería afectado el resultado.

### **2.2.3 Fichas justificativas:**

Los coeficientes de absorción acústica empleados para el cálculo analítico son los que se establecen en el Catálogo de elementos constructivos del CTE y los que no se contemplan en este catálogo, se han obtenido de fuentes contempladas en la bibliografía adjunta.

Atendiendo a estos criterios de cálculo, se han completado las fichas adjuntas justificativas del tiempo de reverberación del CTE-DB-HR. Se encuentran en su anexo K.3.

Los tiempos de reverberación medios para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz obtenidos son:

Aula B2 = 1.99 s

Aula B3 = 1.68 s

Cafetería = 3.45 s

Tipo de recinto : Aula B2 (ETSAV)		Volumen, V (m <sup>3</sup> ):		471,9232	
Elemento	Acabado	s	α <sub>m</sub>		Absorción acústica (m <sup>2</sup> )
			1000	2000	
Suelo	Terrazo	128,24	0,01	0,02	0,016666667
	Tarima	20,24	0,08	0,1	0,093333333
	Escayola	128,24	0,04	0,05	0,046666667
Paramentos	Enlucido yeso	150,3502	0,01	0,02	0,013333333
	Cortinas	13,68	0,4	0,54	0,486666667
	Puertas (madera contrachapada)	7,8384	0,08	0,08	0,08
	Ventanas pasillo	4,32	0,05	0,04	0,04
	Pantalla proyector	5,125	0,11	0,17	0,173333333
Objetos <sup>(1)</sup>	Tipo				A <sub>O,m</sub> · N
13	Mesa madera	2,183	0,17464	0,15281	0,181916667
130	Asiento madera	0,355	0,0284	0,02485	0,029863333
1	Mesa profesor madera	3,0738	0,245904	0,215166	0,25615
1	Mueble ordenador	2,3492	0,187936	0,164444	0,195766667
0	Persona	0,59	0,98	1,13	0,9
Absorción aire <sup>(2)</sup>			Coeficiente de atenuación del aire, (m <sup>-1</sup> )		
			m <sub>m</sub>		4 · m <sub>m</sub> · V
			500	1000	2000
			0,003	0,005	0,01
					m <sub>m</sub> 0,006
A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )			$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$		38,01289813
T <sub>r</sub> (s)			$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$		1,98637083
Tiempo de reverberación resultante	T (s) =	1,98637083	≤	0,5 (NO CUMPLE)	



Tipo de recinto : Aula B3 (ETSAV)		Volumen, V (m <sup>3</sup> ):		Absorción acústica (m <sup>2</sup> )	
Elemento	Acabado	s	Coeficiente de absorción acústica medio		α <sub>m</sub> · S
			1000	2000	
Suelo	Terrazo	94,12	0,02	0,02	1,3425
	Tarima	13,57	0,1	0,1	1,266533333
Techo	Escayola	94,12	0,05	0,05	4,392266667
Paramentos	Enlucido yeso	255,5004	0,01	0,02	3,406672
	Cortinas	15,407	0,54	0,52	7,498073333
	Puertas (madera contrachapada)	7,8384	0,08	0,08	0,627072
	Ventanas pasillo	7,11	0,04	0,03	0,2844
	Pantalla proyector	5,125	0,17	0,24	0,888333333
Objetos <sup>(1)</sup>	Tipo		Área de absorción acústica equivalente media, A <sub>O,m</sub> (m <sup>2</sup> )		A <sub>O,m</sub> · N
11	Mesa madera	1,9684	0,187472	0,118104	1,732192
99	Asiento madera	0,355	0,0284	0,0213	2,8116
1	Mesa profesor madera	3,0738	0,245904	0,15369	0,235658
1	Mueble ordenador	2,3492	0,187936	0,140952	0,187936
0	Persona		0,98	1,13	0
Absorción aire <sup>(2)</sup>			Coeficiente de atenuación del aire, (m <sup>-1</sup> )		4 · m <sub>m</sub> · V
			m <sub>m</sub>		
			500	1000	8,3126784
			0,003	0,005	
A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )			500	1000	2000
Absorción acústica del recinto resultante			0,003	0,005	0,01
T <sub>r</sub> (s)			$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} S_i + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$		32,98591507
Tiempo de reverberación resultante			$T = \frac{0,16 V}{A}$		1,68004604
	T (s)=	≤	0,5 (NO CUMPLE)		

Tipo de recinto : Cafetea (ETSAV)		Volumen, V (m <sup>3</sup> ):		439,124	
Elemento	Acabado	S	$\alpha_m$		Absorción acústica (m <sup>2</sup> )
			Coeficiente de absorción acústica medio		
Suelo	Terrazo	156,83	500	2000	$\alpha_m \cdot S$
			0,01	0,02	
Techo	Enlucido de yeso	156,83	0,01	0,02	2,091066667
Paramentos	Enlucido yeso	92,1815	0,01	0,02	1,229086667
	Vidrio	53,6585	0,05	0,03	2,14634
	Ventana aluminio y vidrio	22,88	0,05	0,03	0,9152
	Chapa metálica	27,756	0,01	0,02	0,4626
				0	0
Objetos <sup>(1)</sup>	Tipo		Área de absorción acústica equivalente media, $A_{O,m}$ (m <sup>2</sup> )		$A_{O,m} \cdot N$
1	Maquinas expendedoras	27,52	500	2000	$A_{O,m}$
			0,2752	0,5504	0,366933333
0	Persona		0,59	1,13	0,9
Absorción aire <sup>(2)</sup>			Coeficiente de atenuación del aire,		$4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$
			$\overline{m}_m$ (m <sup>-1</sup> )		
			500	2000	$\overline{m}_m$
			0,003	0,01	0,006
$A_s$ (m <sup>2</sup> )			$A = \sum_{j=1}^n \alpha_{m,j} S_j + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$		20,364036
Absorción acústica del recinto resultante			$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$		3,45019229
T, (s)					
Tiempo de reverberación resultante					
	T (s) =	3,45019229			
		≤	0,9 (NO CUMPLE)		

## 2.3 ENSAYOS REALIZADOS:

A continuación se explica, el equipo de medida utilizado, el protocolo de medida que se ha seguido para realizar los ensayos, un resumen de la metodología e instrucciones de cómo realizar las mediciones para calcular el tiempo de reverberación con el sonómetro 2250 de Brüel & Kjaer, los resultados obtenidos en las mediciones de campo y un análisis crítico de los mismos. Por último se añaden posibles propuestas de mejora y una tabla con los cálculos teóricos según el CTE-DB-HR de las mismas.

### 2.3.1 Equipo de medida utilizado:

Para realizar las mediciones del Tiempo de Reverberación por el Método de ruido interrumpido según ISO 3382-2:2008, es necesario disponer de un sonómetro, un transductor, un calibrador, un amplificador, una fuente sonora omnidireccional, un ordenador, el cableado de conexión, trípodes, y un software para la recogida de datos y su posterior procesado.

El equipo de medida que se ha utilizado en este caso es en su totalidad de la marca Brüel & Kjaer y se recoge en la tabla siguiente:

Equipo [Brüel & Kjaer]
Hand-held Analyzer Type 2250
Transductor 4189
Power Amplifier Type 2716
Omni Power 4292
Software BZ 5503



Sonómetro: Hand-held Analyzer  
Type 2250



Transductor: 4189



Amplificador: Power Amplifier  
Type 2716



Fuente sonora omnidireccional:  
Omni Power 4292

### 2.3.2 Protocolo de medida:

#### Índice a evaluar:

- El índice que se va a evaluar es el Tiempo de Reverberación.

#### Normativa aplicable:

- CTE-DB-HR
- UNE-EN-ISO 3382-2:2008

#### Equipo utilizado:

- (Punto 2.3.1) Sonómetro, transductor, amplificador, fuente acústica, software...
- Es recomendable comprobar mediante un calibrador, el grado de exactitud del sonómetro o del transductor. En nuestro caso se ha utilizado el calibrador Type 4231 de la marca Brüel & Kjaer, que emite una frecuencia constante de 94dB.

#### Método necesario para calcular el Tiempo de Reverberación o la absorción del recinto:

- Método de ingeniería:
  - Combinaciones fuente-micrófono: 6
  - Posiciones de la fuente: 2 o más
  - Posiciones del micrófono: 2 o más
  - Número de decrecimientos en cada posición: 2
  - Rango de frecuencias en bandas de octava: 125Hz - 4000Hz

En nuestro caso se han elegido dos posiciones para la fuente y tres para el micrófono, resultando así una combinación fuente-micrófono de 6 posiciones.

#### Posiciones de medición:

- Fuente:

Es recomendable colocar la fuente en las posiciones normales en función del uso del recinto, es decir, en el lugar donde sea habitual que se encuentre el emisor.

- Micrófono o transductor:

Las posiciones del micrófono deben estar preferiblemente separadas al menos media longitud de onda, es decir, a una distancia mínima de 2m para el rango de frecuencias habitual. La distancia desde cualquier posición de micrófono hasta la superficie reflectora más cercana, incluyendo el suelo o mobiliario, debe de ser preferiblemente al menos un cuarto de longitud de onda, es decir, generalmente un metro. Se deben evitar posiciones simétricas.

Las posiciones del micrófono no deben estar muy próximas porque si no, el número de posiciones independientes, sería inferior al número real de posiciones de medición. Además, ninguna posición del micrófono puede estar muy próxima a la posición de la fuente, para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo.

#### **Método de medición:**

- Método del ruido interrumpido:

La señal de la fuente omnidireccional debe de ser un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio. La fuente debe de ser capaz de producir un nivel de presión acústica suficiente para garantizar una curva de decrecimiento que empiece al menos 35 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencias correspondiente, para medir en  $T_{20}$ . En caso de medir en  $T_{30}$  será de 45 dB.

Para las mediciones en bandas de octava el ancho de banda de la señal debe de ser mayor o igual a una octava.

Para el método de ingeniería, que es el que se va a utilizar, la duración de excitación del recinto debe de ser suficiente para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente, es decir, al menos durante la mitad del tiempo de reverberación resultante.

#### **Promediado de las mediciones:**

- Se realiza hallando los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de decrecimiento de cada una de las frecuencias en bandas de octava, y tomando el valor medio.

#### **Expresión de los resultados:**

- Los tiempos de reverberación de cada frecuencia de medición se presentan en una tabla indicando en ella si se utiliza un decaimiento de 20dB ( $T_{20}$ ) o si se tiene en cuenta 30dB ( $T_{30}$ ). Normalmente se utiliza  $T_{20}$  porque analiza la primera parte del decrecimiento, y la evaluación subjetiva de la reverberación está relacionada con la primera parte del decrecimiento. Además es más sencilla y exacta realizar la medición, con los equipos de medida habituales, en  $T_{20}$  que en  $T_{30}$ .

En nuestro caso se mide en  $T_{20}$  pero además se expresan los resultados en una gráfica Tiempo - Frecuencia del  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , y EDT.

El EDT (Early Decay Time), es el tiempo de decaimiento temprano. Se obtiene multiplicando por seis el tiempo en segundos que transcurre desde la llegada del sonido directo hasta que el nivel de presión sonora ha decaído 10dB. Está más relacionado con la percepción subjetiva de la reverberación y con la geometría de la sala. Se suele emplear cuando se está cerca de un resonador, en recintos con balcones profundos, cuando hay dos recintos acoplados, etc.

### 2.3.3 Metodología e instrucciones de uso del sonómetro:

#### Hand-held Analyzer Type 2250 (Brüel & Kjaer)

A continuación se va realizar un resumen de la metodología e instrucciones de cómo realizar las mediciones para calcular el tiempo de reverberación con el sonómetro 2250 de Brüel & Kjaer.

1- Se enciende el sonómetro, pulsando en el botón de encendido.

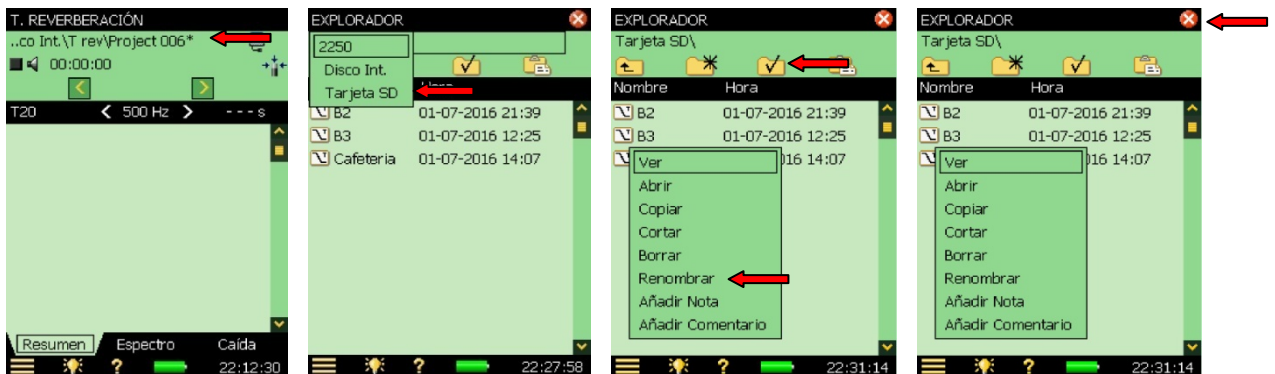
2- Se selecciona la plantilla deseada, pulsando en la franja negra superior. En este caso seleccionamos la de T. Reverberación. Pulsar abrir.



Sonómetro: Hand-held Analyzer Type 2250

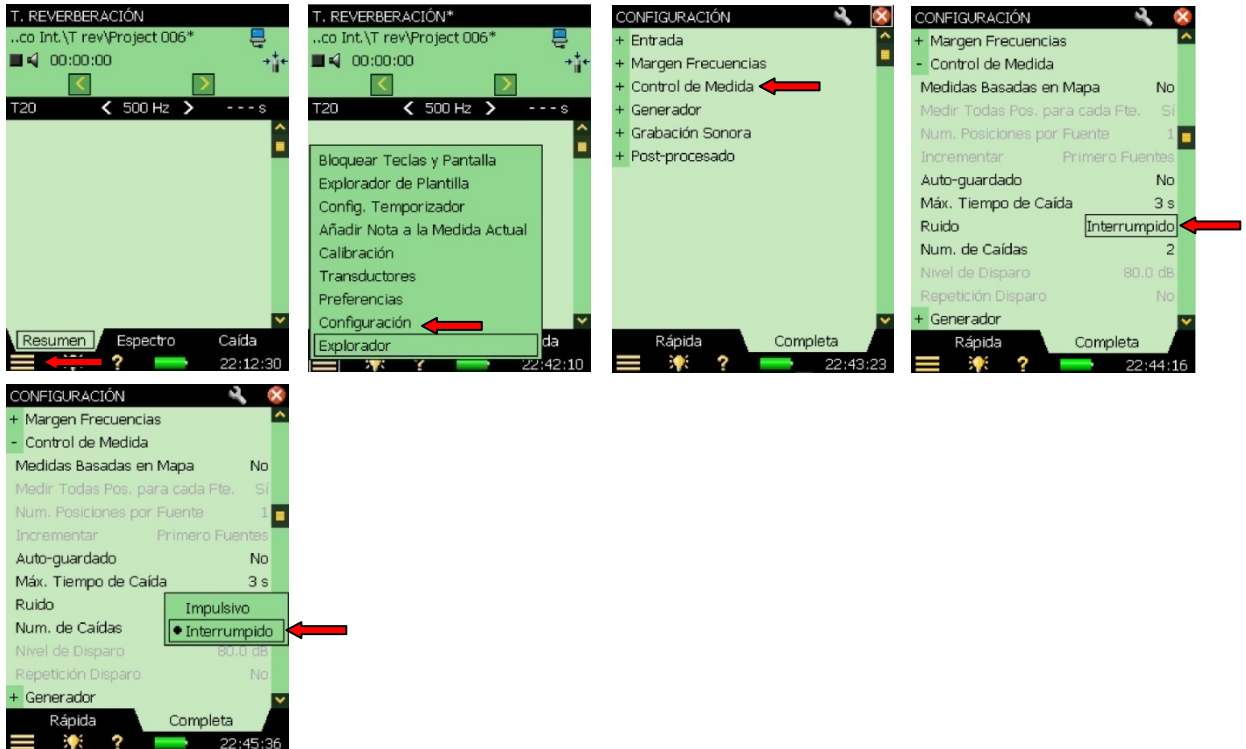


3- Seleccionamos la ruta de guardado pulsando en la segunda línea de texto que aparece en la pantalla. Puede ser la memoria interna o una tarjeta SD. Posteriormente seleccionamos la nueva ruta de guardado, ya sea en una carpeta existente o una nueva. Y confirmamos pulsando sobre el símbolo de carpeta con el tick. También podemos darle un nombre al nuevo archivo creado, pulsando sobre el archivo y luego en renombrar. Para volver a la pantalla inicial pulsamos la "X" roja superior derecha.



3-Ahora toca seleccionar el método de medida deseado, ya sea de excitación impulsiva, (disparo, palmada, estallido de globo...) o el de ruido interrumpido. Para ello pinchamos en las cuatro líneas amarillas de la esquina inferior izquierda. Pulsamos "configuración", seleccionamos "control de medida". Dentro de este menú, podemos configurar todos los

parámetros necesarios como ruido "interrumpido o impulsivo", en nuestro caso interrumpido. Además podríamos modificar el número de caídas deseado, en nuestro caso 2, el máximo tiempo de caída, en nuestro caso 3s.



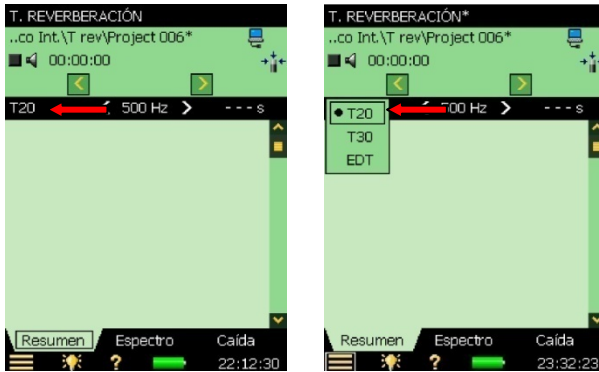
4-Al igual que en el paso anterior, en este mismo menú, seleccionaremos el "margen de frecuencias", en nuestro caso un ancho de banda de una octava, una frecuencia superior de 125Hz y una inferior de 4KHz.

5-Hacemos lo mismo con el "generador", en nuestro caso seleccionamos, tipo de generador interno, tipo de ruido rosa, tiempo de escape 10s y tiempo de subida 2s.

5-Hacemos lo mismo con el "post-procesado", en nuestro caso, promedio conjunto si, TR inferior 500Hz y TR superior 2KHz. Normalmente se suele seleccionar un rango de frecuencias para el promediado de 500-1000Hz pero en este caso no lo hemos hecho para poder comparar los resultados obtenidos con los de las fichas contenidas en el CTE, que contemplan el rango de frecuencias de 500Hz-2000Hz.

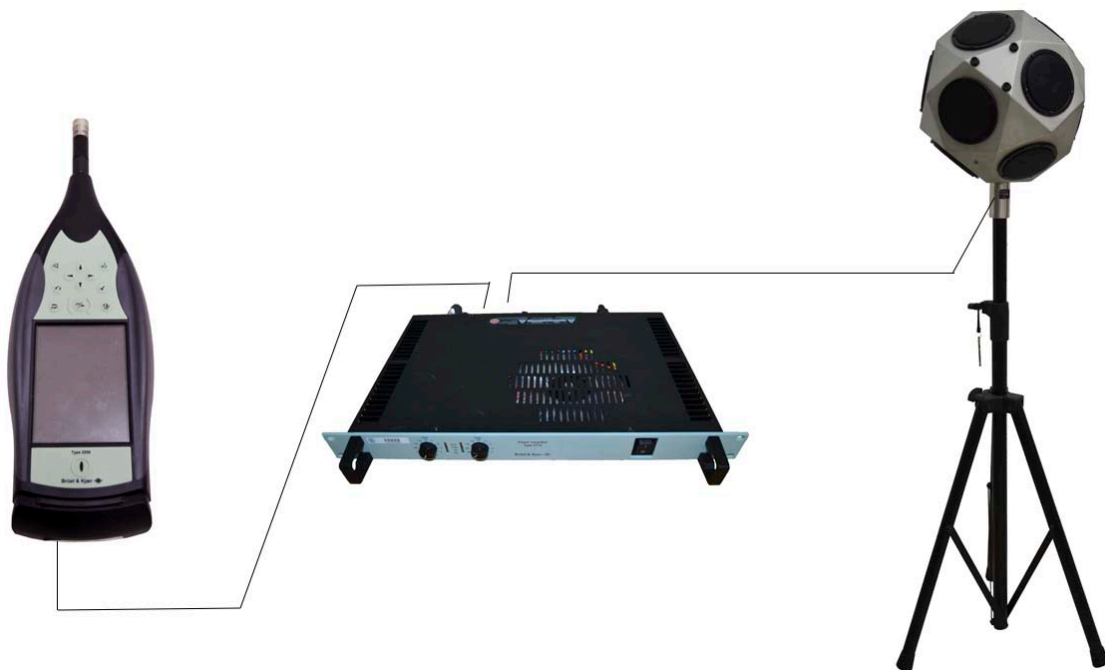
Cuando acabemos con la configuración, presionamos para volver a la pantalla inicial, la "X" roja superior derecha.

5-Ahora tenemos que seleccionar los dB de decaimiento con los que queremos que el sonómetro calcule el TR. En nuestro caso 20dB por lo tanto seleccionamos  $T_{20}$ . Podía ser  $T_{30}$  o EDT, pero como se ha explicado anteriormente en el "protocolo de medida", en la "expresión de resultados", es preferible el  $T_{20}$ . Aún así, luego se podrán consultar también los otros valores.



5-Podríamos calibrar el sonómetro si fuese necesario pero es muy probable que este correcto, debido a que lo he calibrado recientemente. Para ello había que pulsar las tres líneas amarillas de la esquina inferior izquierda, seleccionar calibrar, conectar el calibrador, y seguir los pasos que nos indica el manual de usuario en su capítulo 5, "Calibración".

6-Una vez configurado el sonómetro podemos proceder a conectar el amplificador en la clavija bajo la tapa inferior de "output" y la fuente omnidireccional a la salida del amplificador. Según el siguiente esquema.



Esquema de conexión

7-Una vez conectado todo correctamente y enchufado el amplificador, lo encendemos y situamos la rueda izquierda de "Gain" en la posición -16. La mayoría de las veces va a ser suficiente ese nivel para conseguir que la curva de decrecimiento comience al menos 35dB por encima del ruido de fondo. Si no fuese así, elevaríamos el nivel hasta -10, por ejemplo, hasta conseguirlo. Para realizar correctamente la medición habría que medir el ruido de fondo, sería suficiente con 5 medidas. La manera de realizarlo de forma resumida, sería seleccionar una plantilla de "sonómetro" y medir el ruido de la estancia guardando el mayor silencio posible.



8-A continuación situamos las posiciones de la fuente y del micrófono correctamente, como se indica en el apartado "*Protocolo de medida*", "*Posiciones de medición*".

9-Ahora, pulsamos el botón de Play/Pause para empezar la medición. La primera medición deberemos desecharla, puesto que no se activa la primera vez el tiempo de escape programado. La borramos pulsando en botón inferior izquierdo del sonómetro. (Flecha con un "0").

Luego volvemos a realizar la medición pulsando de nuevo Play/Pause, en ésta no sonará la fuente hasta pasados 10 segundos de escape, en los que saldremos del recinto.



**Iniciar (Play/pause)**

**Borrar**

**Guardar**

10- Una vez realizados los dos decaimientos, entraremos y comprobamos que la medición sea correcta. Para ello observamos que junto a las dos flechitas amarillas sobre un recuadro verde de la pantalla, no aparezca un emoticono de una cara amarilla o roja. En tal caso, no sería válida y borraríamos la medición para volverla a realizar.

10-Cuando hemos realizado la medición correctamente, pulsamos el botón inferior derecho del sonómetro para guardar la medición de la primera posición en la ruta que especificamos con anterioridad.

11-Repetiremos el proceso las veces que sea necesario según las posiciones que necesitemos medir. En nuestro caso, 6.

12- Ya hemos realizado la medida del tiempo de reverberación. Para poder consultarlo, basta con seleccionar la posición. Seleccionar la frecuencia que deseemos consultar. Al lado de la frecuencia seleccionada aparecerá el tiempo de reverberación de dicha frecuencia. Para consultar las gráficas de la curva de decaimiento y el espectro de frecuencias, basta con movernos por el menú de Resumen, Espectro y Caída de la parte inferior de la pantalla.

13- Ya hemos finalizado y estamos en disposición de apagar el dispositivo extraer la tarjeta SD y poder consultar los datos y las gráficas en un ordenador con el software BZ-5503 instalado.

### 2.3.4 Tablas de resultados y gráficas.

#### Tablas:

Una vez realizadas las mediciones de campo, los datos se han presentado en unas tablas Excel, donde aparecen los tiempos de reverberación de cada frecuencia y en cada posición. Además se calcula el tiempo de reverberación medio de las frecuencias de 500, 1000 y 2000Hz. El ruido de fondo del Aula B2, Aula B3 y la Cafetería fue de 37dB, 28dB y 42dB respectivamente.

Recinto	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Aula B2	128,24	471,923
Aula B3	94,12	346,362
Cafetería	156,83	439,124

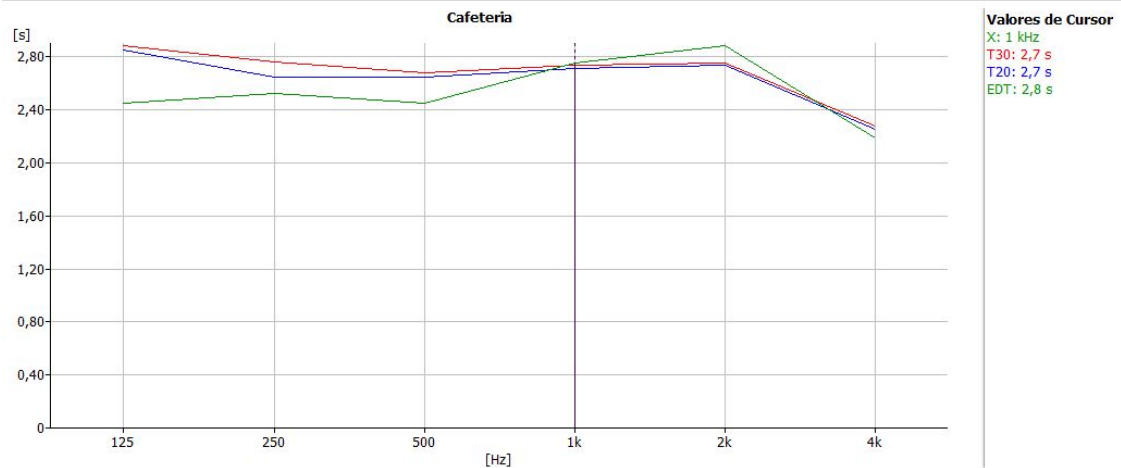
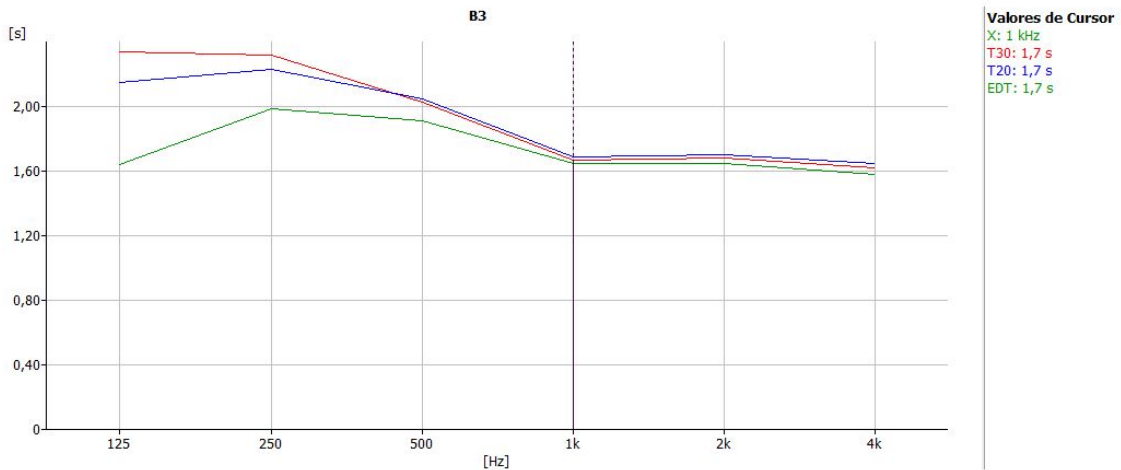
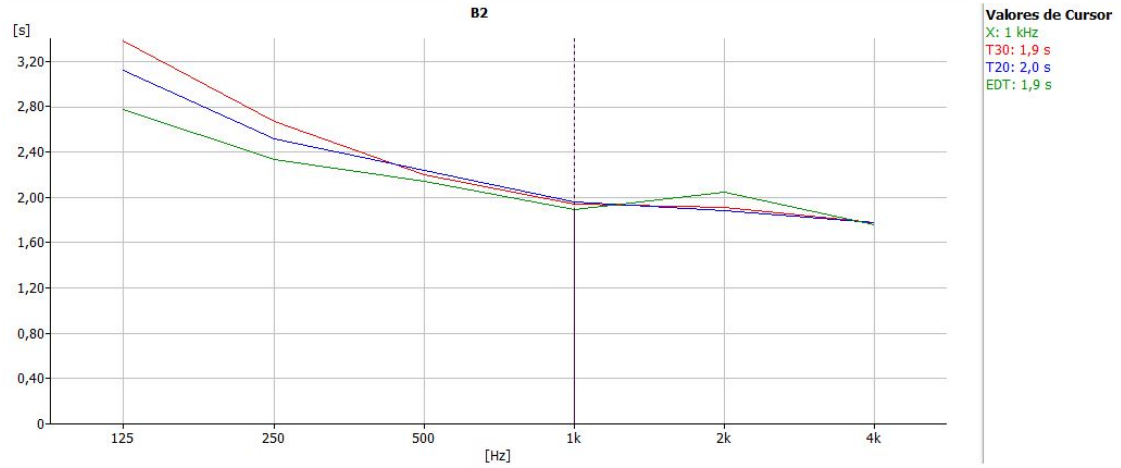
T20 [s]	Posición	Bandas de frecuencia por octava [HZ]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Aula B2							
	F1,P1	2,67	2,89	2,28	1,99	1,97	1,82
	F1,P2	2,49	2,30	2,34	1,90	1,88	1,79
	F1,P3	2,25	2,46	2,30	1,96	1,85	1,72
	F2,P1	3,65	2,48	2,40	1,96	1,89	1,78
	F2,P2	2,76	2,73	2,29	1,99	1,92	1,75
	F2,P3	2,16	2,46	2,26	1,96	1,92	1,81
	Promedio	2,663	2,553	2,312	1,96	1,905	1,778
TRmid [s]	(500,1k,2k)[Hz]	2,059					

T20 [s]	Posición	Bandas de frecuencia por octava [HZ]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Aula B3							
	F1,P1	2,21	2,27	1,92	1,68	1,66	1,66
	F1,P2	2,16	2,24	2,13	1,65	1,73	1,66
	F1,P3	2,99	2,06	2,12	1,72	1,70	1,61
	F2,P1	2,10	2,29	2,19	1,74	1,68	1,64
	F2,P2	2,16	2,41	2,08	1,63	1,71	1,71
	F2,P3	2,10	2,46	2,08	1,77	1,78	1,66
	Promedio	2,287	2,288	2,087	1,698	1,710	1,657
TRmid [s]	(500,1k,2k)[Hz]	1,832					

T20 [s]	Posición	Bandas de frecuencia por octava [HZ]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Cafetería							
	F1,P1	3,06	2,83	2,85	2,76	2,76	2,26
	F1,P2	2,45	2,81	2,76	2,77	2,73	2,25
	F1,P3	2,82	2,83	2,47	2,68	2,85	2,29
	F2,P1	2,95	2,51	2,79	2,59	2,71	2,19
	F2,P2	3,08	2,83	2,56	2,77	2,70	2,28
	F2,P3	2,79	2,53	2,68	2,79	2,73	2,27
	Promedio	2,858	2,723	2,685	2,727	2,747	2,257
TRmid [s]	(500,1k,2k)[Hz]	2,719					

**Gráficas:**

A continuación se expresan los resultados promediados por recintos en unas gráficas Tiempo - Frecuencia del  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , y EDT. Los valores de cursor son los que corresponden a 1000Hz.



### 2.3.5 Comentarios de los resultados obtenidos

A la vista de los resultados obtenidos y representados en las gráficas se puede determinar que los valores del tiempo de reverberación hallados con  $T_{20}$  y  $T_{30}$  son muy similares y casi coincidentes a partir de frecuencias medias de 500Hz, sin embargo, los valores del EDT son más dispares, pero más o menos coincidentes con  $T_{20}$  y  $T_{30}$  a partir de la frecuencia de 1000Hz.

TR	Valor teórico [s]	Medición [s]	Desviación [%]
Aula B2	1,99	2,06	3,40
Aula B3	1,68	1,83	8,20
Cafetería	3,45	2,72	26,84

#### **Aulas:**

Si se comparan los resultados teóricos de las fichas con los obtenidos en las mediciones in situ, se ve que el porcentaje de desviación es asumible en las aulas, pues no llega al 10%. Se puede ver que el valor teórico del tiempo de reverberación en las aulas es algo menor que el de la medición. Esto puede ser debido, a que los coeficientes de absorción acústica " $\alpha$ " empleados (del catálogo de elementos constructivos del CTE) no coincidan exactamente con los reales del aula y sean algo menores.

En general se puede considerar que en el caso de las aulas, el método propuesto por el CTE limitado a aulas de hasta 350m<sup>3</sup>, por lo menos en este caso, es perfectamente aplicable a aulas de volúmenes superiores como mínimo hasta los 470m<sup>3</sup>. Además parece lógico pensar que sería posible aplicar el método a espacios mayores siempre y cuando se modificasen algunos valores de cálculo.

#### **Cálculo del área de absorción sonora equivalente:**

En cuanto al método de cálculo propio empleado para calcular el área de absorción acústica equivalente del mobiliario, en principio y a falta de ser experimentado en otro tipo de recintos, parece razonable considerarlo como válido, puesto que en ambos casos la desviación de resultados es baja. Probablemente para alcanzar mayor precisión sería necesario realizar algún ajuste en función de las geometrías de los cuerpos o de su posición en el recinto. Siendo imprescindible comparar el resultado teórico con el obtenido en una cámara reverberante, para poder dar validez real al método.

#### **Cafetería:**

En el caso de la cafetería, se puede comprobar que la desviación de resultados no es asumible. Es casi de un 27%. Además en este caso el valor teórico es mucho mayor que el de la medición, es decir, justo al revés de lo que sucedía en el caso de las aulas.

Probablemente la explicación a la diferencia de resultados esté en cómo se comportan acústicamente los materiales que la forman, la geometría del recinto y a haber despreciado la absorción de las luminarias. La solución constructiva de las particiones de la cafetería, se realiza a base de mamparas de vidrio de suelo a techo. Como se ve en su gráfica correspondiente, la absorción es más constante en todas las frecuencias, que en las aulas. Lo

que pone de manifiesto que se absorben más, las frecuencias más bajas. Esto es debido probablemente, a que los paños de vidrio son muy grandes, y entran en resonancia a frecuencias bajas, absorbiendo dichas frecuencias.

Además parte del "apéndice lateral" del recinto y las máquinas expendedoras, están revestidas con chapas metálicas. La chapa no es porosa y el mecanismo de absorción principal no es por tanto resistivo sino reactivo, las ondas de presión deforman la chapa, comprimen el aire de la cámara y deforman la siguiente chapa. Esto provoca que la absorción acústica sea mayor a la esperada ya que sólo se tuvo en cuenta su absorción por su porosidad.

Otro aspecto que puede influir, es haber despreciado la absorción de las luminarias, canaletas y cableado del techo, ya que modifican significativamente la geometría del techo y por tanto también su grado de absorción sonora.

Por último cabe destacar que el método de cálculo empleado no tiene en cuenta la geometría del recinto. En el caso de la cafetería, encontramos un apéndice lateral del recinto principal, unos pilares que sobresalen del plano del paramento de vidrio, y un techo que debido a las instalaciones se presenta bastante irregular. Estas irregularidades favorecen a que se produzca una mayor absorción sonora y por tanto que disminuya el tiempo de reverberación teórico.

Por ello, se podría decir que las características del recinto de la cafetería, y la tipología y colocación de sus materiales, contribuyen a modificar los resultados del tiempo de reverberación reales. Así, dado que esos aspectos no se tienen en cuenta en el método de cálculo teórico que el CTE-DB-HR contempla, se puede justificar que en este caso, no coincida el tiempo de reverberación teórico con el medido en el recinto.

**Cumplimiento del CTE-DB-HR.**

En este caso, como se ha comentado con anterioridad en el trabajo, no sería necesario cumplir el CTE, pero si lo tomamos como referencia, vemos que todos los recintos están muy lejos de cumplir sus exigencias. Esto implica que la inteligibilidad de la palabra es muy mala y por tanto muy recomendable realizar mejoras del acondicionamiento acústico de los recintos analizados.

A continuación se adjunta una tabla comparativa con los valores teóricos, los medidos y las exigencias del CTE-DB-HR.

TR	Valor teórico [s]	Medición [s]	CTE-DB-HR [s]
Aula B2	1,99	2,06	0,50
Aula B3	1,68	1,83	0,50
Cafetería	3,45	2,72	0,90

### 2.3.6 Posibles propuestas de mejora:

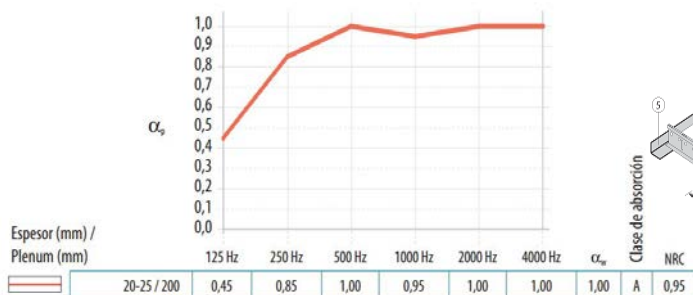
La propuesta de mejora se va a plantear sobre el aula B2, dado que es la que ha presentado mayor exactitud de cálculo. La solución planteada sería igualmente aplicable al aula B3 o incluso a la cafetería.

La solución que más se suele aplicar para mejorar el acondicionamiento acústico de los diferentes recintos, consiste en colocar un falso techo absorbente acústico. Esta solución es barata, sencilla y rápida de ejecutar. Proporcionando excelentes resultados y permitiendo el paso de instalaciones, que en otras circunstancias, deberían de quedar vistas.

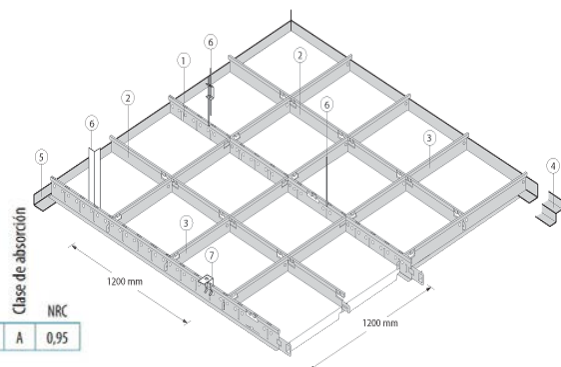
También se pueden adoptar otras soluciones en caso de no disponer de altura suficiente, como colgar figuras geométricas de materiales absorbentes del techo, o colocar absorbentes acústicos, como paneles o piezas que se distribuyen por el recinto intervenido.

En el caso particular del aula, la solución que aparentemente resulta más adecuada debido a la gran altura libre de la que se dispone, (3.65m) consiste en sustituir el techo de escayola por uno absorbente acústico, o bien colgarlo bajo éste. Con esta solución, además de aumentar la absorción sonora, disminuimos el volumen del aula, contribuyendo a mejorar todavía más su comportamiento acústico.

El techo que se ha elegido es de la marca Rockfon serie Blanka 20mm. Éstas son sus prestaciones, y el sistema de montaje.



Prestaciones



Sistema de montaje

Además, en este caso, se va a tener en cuenta la contribución de la presencia de 15 personas con ropa ligera y en posición sentada, ya que es lógico suponer esa ocupación mínima permanente, debido a su uso como espacio docente de la ETSAV. ( El tiempo de reverberación de la solución sin personas sería de 0.45s < 0.5. Cumpliría igualmente.)

A continuación se adjunta la misma tabla de cálculo empleada anteriormente, pero esta vez reflejando las mejoras propuestas.

Se puede ver que se reduce significativamente el tiempo de reverberación medio, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000Hz. Pasando a ser de 1.99s a 0.42s (valores teóricos). Consecuentemente mejoraría en gran medida la inteligibilidad de la palabra.

Tipo de recinto: Aula B2 (ETSAV)		Volumen, V (m <sup>3</sup> ):			443,7104	
Elemento	Acabado	S	α <sub>m</sub>			Absorción acústica (m <sup>2</sup> )
			Coeficiente de absorción acústica medio			
		500	1000	2000	α <sub>m</sub> · S	
Suelo		128,24				
	Terrazo	108	0,01	0,02	0,02	0,016666667
	Tarima	20,24	0,08	0,1	0,1	0,093333333
Techo		128,24				
	Rokfon Blanca 20mm	1	0,95		1	0,983333333
Paramentos		139,5108				
	Enlucido yeso	139,5108	0,01	0,01	0,02	0,013333333
	Cortinas	13,68	0,4	0,54	0,52	0,486666667
	Puertas contrachapada (madera)	7,8384	0,08	0,08	0,08	0,627072
	Ventanas pasillo	4,32	0,05	0,04	0,03	0,1728
	Pantalla proyector	5,125	0,11	0,17	0,24	0,888333333
Objetos <sup>(1)</sup>						
			Área de absorción acústica equivalente media, A <sub>O,m</sub> (m <sup>2</sup> )			A <sub>O,m</sub> · N
			500	1000	2000	A <sub>O,m</sub>
13	Mesa madera	2,183	0,2183	0,17464	0,15281	0,181916667
130	Asiento madera	0,355	0,0355	0,0284	0,02485	0,029583333
1	Mesa profesor madera	3,0738	0,30738	0,245904	0,215166	0,25615
1	Mueble ordenador	2,3492	0,23492	0,187936	0,164444	0,195766667
15	Persona con ropa ligera		0,59	0,98	1,13	0,9
Absorción aire <sup>(2)</sup>			Coeficiente de atenuación del aire, $\overline{m}_m$ (m <sup>-1</sup> )			
			500	1000	2000	$4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$
			0,003	0,005	0,01	$\overline{m}_m$
						0,006
A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} S_i + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m}_m \cdot V$					
Absorción acústica del recinto resultante						
T <sub>r</sub> (s)	$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$					
Tiempo de reverberación resultante						
T (s) =	0,42	S	0,5 (CUMPLE)			0,415630899

## **2.4 Bibliografía**

- 1-CARRION ISBERT, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona, Edicions UPC, 1998.
- 2-MIYARA, Federico. Acústica y Sistemas de Sonido. Rosario, Argentina, Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, 2000.
- 3- JARAMILLO JARAMILLO, Ana Mara. Acústica: la ciencia del sonido. Medellín, Colombia, ITM Editorial, 2007.
- 4- MÖLLER, Oscar. W.SIGNORELLI, Javier. Mecánica Computacional Vol XXX. Rosario, Argentina, Asociación Argentina de Mecánica Computacional. 2011.
- 5-RODRIGUEZ RODRIGEZ, Francisco Javier. Guía acústica de la construcción. Madrid, Editoriales Dossat, 2006.
- 6-GOMEZ ANDRES, Rocío. Estudio de la calidad acústica del aula máster del edificio 1C de la ETSIE. Valencia, Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación, 2012.
- 7-RUIZ DELGADO, Ligia. Representación gráfica de la Primera Reflexión en espacios destinados a la palabra. Análisis comparativo de aulas. Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- 8- DE ÁVALOS. Juan. Placo escuelas. Soluciones constructivas Placo para el sector educativo.
- 9-CTE. Documento Básico HR Protección frente al ruido. Con comentarios del Ministerio de Fomento. Articulado Septiembre 2009, Comentarios 2015.
- 10-CTE. Catálogo de elementos constructivos. Actualización 2011, Ministerio de Fomento.
- 11-UNE-EN-ISO 3382-2:2008. Medición de parámetros acústicos en recintos ordinarios. Parte2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.
- 12-BRÜEL & KJAER. Programa de tiempo de reverberación BZ-7227, 2250 para el analizador portátil - Tipo 250. Datos del producto. 2009.
- 13-BRÜEL & KJAER. Analizador portátil Tipo 2250. Manual de usuario. 2009.
- 14- <http://www.rockfon.es>
- 15-<https://www.isover.es>
- 16-<https://www.placo.es>