



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE INGENIERÍA
Año 2019 - 2^{do} Cuatrimestre

ACÚSTICA (86.57)

**Clase de laboratorio:
Ensayos acústicos de pantallas**

ALUMNOS:

Lean Cole, Micaela # 96364
<mleancole@icloud.com>

Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Especificaciones	1
1.3. Descripción de la muestra ensayada	1
2. Medición de aislamiento acústico al ruido aéreo	1
2.1. Metodología de las mediciones	1
2.2. Valores medidos	2
2.3. Análisis de las mediciones	3
2.4. Cálculo del índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo ($D L_R$)	6
2.5. Clasificación del comportamiento de aislamiento	7
3. Medición de absorción sonora en cámara reverberante	7
3.1. Metodología de las mediciones	7
3.2. Valores medidos	8
3.3. Análisis de las mediciones	9
3.4. Índice de evaluación de la absorción sonora ($D L_\alpha$)	12
3.5. Clasificación del comportamiento de absorción	12
4. Conclusiones: análisis de los resultados obtenidos	13

1. Introducción

1.1. Objetivos

En este informe se busca aplicar los conocimientos adquiridos durante la visita al Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, en donde se realizaron ciertas experiencias con la cámara reverberante, la cámara anecoica y el tubo de Kundt. En particular, el objetivo consta en caracterizar unas pantallas que se desean instalar en un proyecto real, por lo que se realizará el análisis adecuado para saber si cumplen con las características requeridas.

1.2. Especificaciones

El proyecto del viaducto del ramal Retiro-Tigre del tren Mitre requiere instalar unas pantallas que deben tener las siguientes características acústicas:

Característica	Requerimiento	Normativa de aplicación
Aislamiento al ruido aéreo	Categoría B3	UNE-EN 1793-2:2014, Anexo A
Absorción sonora	Categoría A3	UNE-EN 1793-2:2014, Anexo A

1.3. Descripción de la muestra ensayada

Se ensayaron módulos para construcción de barreras acústicas construidos con paneles *tipo sándwich*, conformados por una chapa de acero galvanizado (ciega), una capa de lana de roca y una chapa de acero galvanizado perforada (densidad de perforación del 40%). La superficie de la muestra era de 10 m².

Las pantallas instaladas a lo largo del viaducto del tren Mitre quedarían de la siguiente manera:



Figura 1: Vistas de las barreras acústicas a colocar en el viaducto del Tren Mitre.

2. Medición de aislamiento acústico al ruido aéreo

2.1. Metodología de las mediciones

Para calcular el aislamiento acústico provisto por el cuerpo de la pantalla se siguió el procedimiento de la Norma IRAM 4063-3/2002: *Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción.*

El ensayo se realiza en las cámaras de transmisión horizontal inferiores del laboratorio, que cumplen con los requerimientos de la norma IRAM 4063-1/2002.

En la Figura 2 se muestra cómo se colocaron las pantallas para realizar las mediciones:



Figura 2: Montaje de pantalla para ensayo de aislamiento acústico.

La señal empleada para el ensayo es ruido de banda ancha. El proceso consiste en registrar, tanto en la sala emisora como en la sala receptor, el nivel sonoro continuo equivalente para las distintas frecuencias de ensayo. A los niveles sonoros medidos en el local receptor se les debe aplicar la corrección por ruido de fondo.

Como resultado de este ensayo, se obtiene el **índice de reducción sonora R** de la muestra, expresado en decibeles. Dicho índice depende de la frecuencia, por lo que las mediciones se realizan en bandas de tercios de octavas, para las 18 frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz.

2.2. Valores medidos

Se constató que la temperatura y la humedad permanecieron constantes durante el ensayo y los valores registrados fueron: 20 °C y 52 %, respectivamente. El volumen de las cámaras es de 111.7 m³ (cámara emisora) y de 113.9 m³ (cámara receptora). La muestra ensayada fue construida en el vano de 10 m² existente entre ambas cámaras.

En la Tabla de la Figura 3 se presentan los valores de los parámetros medidos:

Banda	L1 (dB) - Cámara emisora	L2 (dB) - Cámara receptora	RF (dB) - Ruido de fondo	TR (s)
50	62,5	52,9	17,9	6,91
63	62,6	51,3	19,5	7,78
80	76,5	61,4	23,4	7,32
100	80,0	66,6	34,7	5,97
125	81,2	68,6	27,4	5,30
160	80,6	64,4	19,6	3,69
200	77,9	59,4	9,2	2,95
250	79,1	56,0	6,5	2,08
315	79,6	52,7	5,8	2,21
500	81,8	47,9	3,8	1,88
630	78,2	44,2	5,3	1,78
800	77,7	44,7	5,1	1,80
1000	79,0	46,4	5,1	1,77
1250	78,1	46,0	9,7	1,73
1600	79,9	51,0	7,5	1,83
2000	79,8	50,8	7,1	1,84
2500	79,4	47,2	6,4	1,78
3150	79,1	50,1	6,9	1,81
4000	82,3	51,6	7,8	1,64
5000	80,7	50,5	8,0	1,48

Figura 3: Niveles sonoros y tiempo de reverberación medidos.

- L1: nivel sonoro continuo equivalente medido en cámara emisora, en dB;
- L2: nivel sonoro continuo equivalente medido en cámara receptora, en dB;
- RF: nivel sonoro continuo equivalente del ruido de fondo de la cámara receptora, en dB;
- TR: tiempo de reverberación medido en la cámara receptora, en segundos.

2.3. Análisis de las mediciones

A partir de los datos de la tabla, se grafican los niveles sonoros en ambas cámaras para observar el comportamiento de las pantallas frente a distintas bandas de frecuencia:

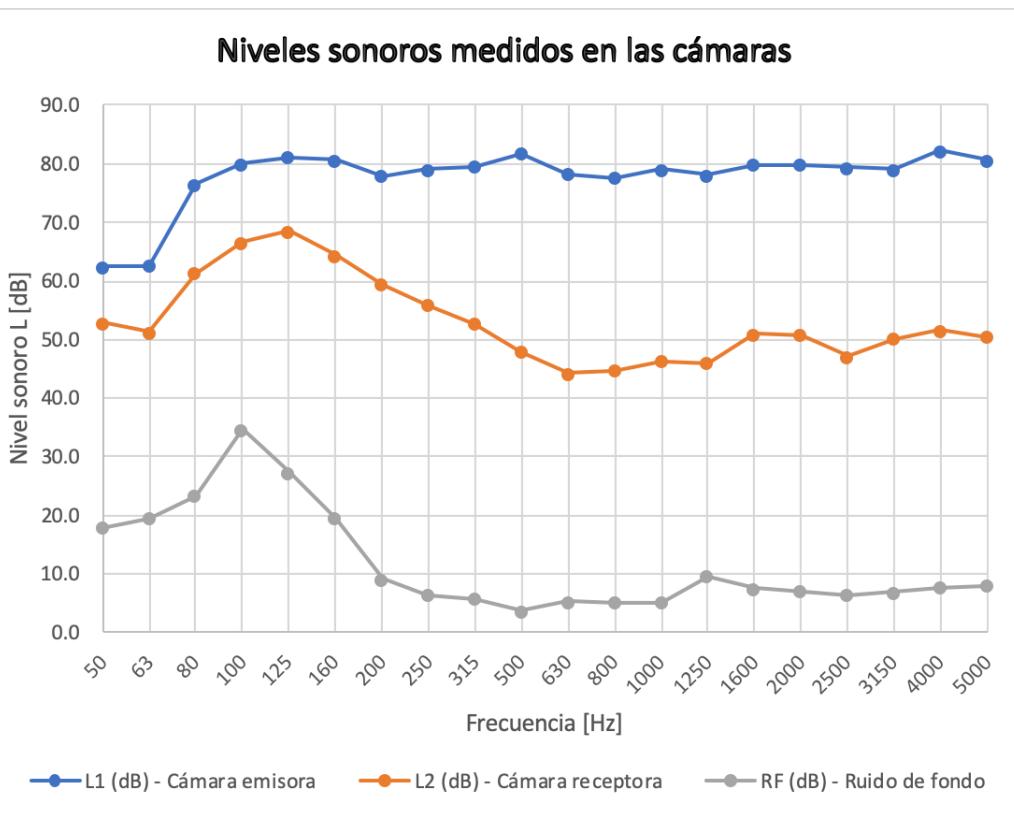


Figura 4: Nivel sonoro en la cámara emisora y receptore para cada banda de tercio de octava.

Se puede ver cómo la presencia de las pantallas logra reducir el nivel sonoro en la cámara receptora frente al de la cámara emisora; el nivel de ruido de fondo en la cámara receptora no parecería afectar el nivel medido en ella. A frecuencias bajas, la pantalla reduce el nivel sonoro en un 15 a 20 % para cada banda; luego de los 160 Hz, comienza a aislar en mayor medida que lo que hacía para frecuencias menores, llegando a aislar el 40 % del nivel incidente.

Con todos estos datos, se puede calcular el **índice de reducción sonora R** a partir de la siguiente expresión según la norma 4063-3. que tiene en cuenta cada frecuencia y la temperatura al momento de la medición:

$$R = L1 - L2_{corregido} + 10 \log\left(\frac{S}{A_2}\right) \quad (1)$$

Este valor se calcula para cada banda de tercio de octava, ya que así se presentan los datos medidos de los niveles sonoros L1 y L2. El ruido de fondo medido en la cámara receptora sirve para poder realizarle una corrección al nivel sonoro medido en la misma con la fuente encendida y así poder calcular el índice R como se debe. En la cámara emisora es tanto más alto lo que se genera, que no tiene sentido corregir por ruido de fondo. El ruido de fondo se mide para cada frecuencia, y puede ocurrir que en algunas bandas el L2 no supere al ruido de fondo en la receptora. La corrección por ruido de fondo es un ejemplo típico de las restas energéticas; se realiza según la expresión:

$$L2_{corregido} = 10 \log(10^{0,1} L2 - 10^{0,1} RF) \quad (2)$$

El parámetro S es la superficie de la muestra ($S = 10 \text{ m}^2$) y A_2 es el **área equivalente de absorción de la cámara receptora**:

$$A_2 = 55,3 \frac{V_2}{c TR_2} \quad (3)$$

La velocidad del sonido varía con la temperatura según $c = 332 + 0.608T$. Usando el dato mencionado de $T = 20^\circ\text{C}$, se calcula $c = 344.16 \text{ m/s}$. V_2 es el dato del volumen de la cámara receptora y TR_2 es su correspondiente tiempo de reverberación para cada banda de frecuencias.

Se hace el ensayo con filtros de tercios de octava (entonces va a haber 21 valores de cada variable que dependa de la frecuencia, que son: TR, L1, L2 y R).

A continuación, se muestra la tabla de valores obtenidos con las expresiones anteriores para cada banda de frecuencia:

Banda	L1 (dB) - Cámara emisora	L2 (dB) - Cámara receptora	RF (dB) - Ruido de fondo	TR (s)	L2 con corrección (dB)	A2 - Área equivalente	Índice R (dB)
50	62,5	52,9	17,9	6,91	52,90	2,65	15,37
63	62,6	51,3	19,5	7,78	51,30	2,35	17,59
80	76,5	61,4	23,4	7,32	61,40	2,50	21,12
100	80,0	66,6	34,7	5,97	66,60	3,07	18,54
125	81,2	68,6	27,4	5,30	68,60	3,45	17,22
160	80,6	64,4	19,6	3,69	64,40	4,96	19,25
200	77,9	59,4	9,2	2,95	59,40	6,20	20,57
250	79,1	56,0	6,5	2,08	56,00	8,80	23,66
315	79,6	52,7	5,8	2,21	52,70	8,28	27,72
500	81,8	47,9	3,8	1,88	47,90	9,73	34,02
630	78,2	44,2	5,3	1,78	44,20	10,28	33,88
800	77,7	44,7	5,1	1,80	44,70	10,17	32,93
1000	79,0	46,4	5,1	1,77	46,40	10,34	32,46
1250	78,1	46,0	9,7	1,73	46,00	10,58	31,86
1600	79,9	51,0	7,5	1,83	51,00	10,00	28,90
2000	79,8	50,8	7,1	1,84	50,80	9,95	29,02
2500	79,4	47,2	6,4	1,78	47,20	10,28	32,08
3150	79,1	50,1	6,9	1,81	50,10	10,11	28,95
4000	82,3	51,6	7,8	1,64	51,60	11,16	30,22
5000	80,7	50,5	8,0	1,48	50,50	12,37	29,28

Figura 5: Tabla de valores calculados para cada banda de frecuencia, para poder graficar el índice R.

Se observa que $L2_{corregido}$ coincide con L2 para todas las bandas de frecuencia; esto ocurre porque la diferencia entre el nivel L2 y el ruido de fondo correspondiente es tan grande (al menos más de 10 dB de diferencia para todos los casos), que el nivel no se ve afectado al realizar el desacople con la corrección. Con los datos de R que figuran en la Figura 5, se grafica este índice en función de la frecuencia:

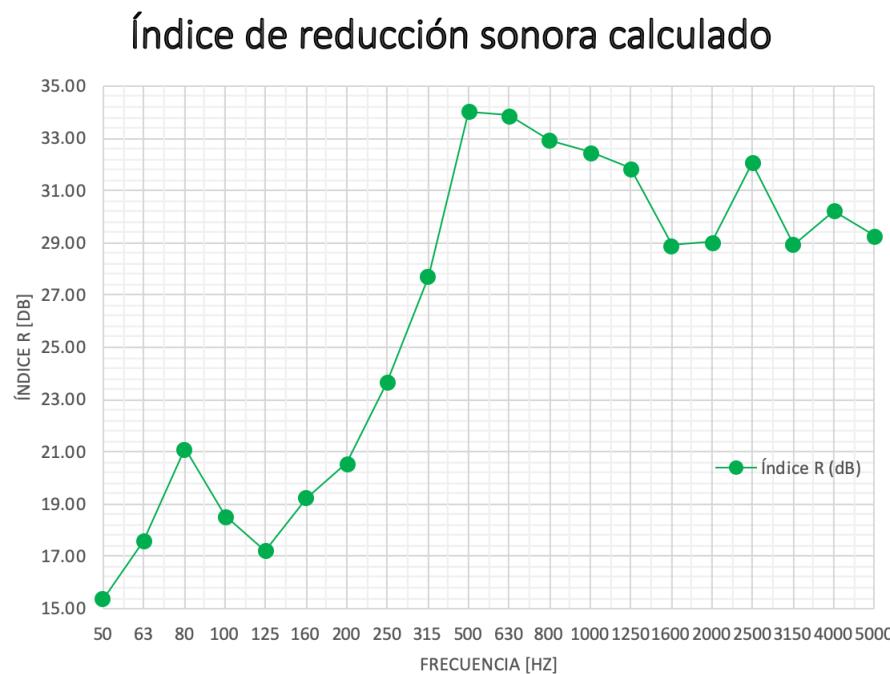


Figura 6: Gráfico del índice de reducción sonora para cada banda de frecuencias.

Mirando la curva de la Figura 6, se puede ver cómo el índice R tiene un valor bajo para las frecuencias más bajas, y va aumentando su valor en cada banda, hasta llegar a un valor máximo de 34,02 dB para los 500 Hz. Luego de esa banda de frecuencia, baja un poco su valor, pero se sigue manteniendo en un nivel mayor al de las frecuencias bajas. Con este análisis, se puede decir que la pantalla aisla mejor para el rango de bandas entre los 500 Hz y 5000 Hz. Teniendo en cuenta que el ruido ferroviario tiene más componentes de altas frecuencias que el ruido de tráfico (debido al ruido de las ruedas del tren con el metal de las vías), este panel es más adecuado para instalar en el ambiente de vías ferroviarias que en una autopista.

2.4. Cálculo del índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo (DL_R)

A partir de los valores del aislamiento del sonido vía aérea dependientes de la frecuencia (índice R), y siguiendo los lineamientos de la norma UNE-EN 1793-2: *Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo en condiciones de campo sonoro difuso*, se calcula el **número global**: este índice es calculado como la diferencia de niveles de presión sonora ponderados A, en decibeles, mediante la siguiente ecuación:

$$DL_R = -10 \log \left(\frac{\sum 10^{0,1 L_i} 10^{-0,1 R_i}}{\sum 10^{0,1 L_i}} \right) \quad (4)$$

Donde:

- R_i : Índice de reducción sonora en la i-ésima banda de tercio de octava correspondiente a la muestra ensayada;
- L_i : Nivel de presión sonora de ruido normalizado ponderado A, en dB, de la i-ésima banda de tercio de octava del ruido normalizado que corresponda utilizar.

Se lo expresa en decibeles, y se redondea al entero más próximo.

Para poder interpretar esta expresión, conviene expresarlo de otra manera, aprovechando las propiedades matemáticas del logaritmo y de la exponentiación:

$$DL_R = -10 \log \left(\frac{\sum 10^{0,1 L_i} 10^{-0,1 R_i}}{\sum 10^{0,1 L_i}} \right) \quad (5)$$

$$DL_R = 10 \log \left(\sum 10^{0,1 L_i} \right) - 10 \log \left(\sum 10^{0,1 (L_i - R_i)} \right) \quad (6)$$

De esta manera, se ve con mayor claridad que este índice refleja una resta energética entre el nivel de presión sonora de ruido normalizado ponderado A y el índice de reducción sonora R. La tabla del espectro normalizado ponderado A es un dato conocido que se puede ver en el Anexo.

Teniendo en cuenta el espectro normalizado para el ruido ferroviario, se calcula siguiendo la expresión dada y se obtiene un valor de 29,59dB, que se debe redondear a:

$$DL_R = 30dB$$

Teniendo en cuenta el espectro normalizado para el ruido de tráfico, se calcula siguiendo la expresión dada y se obtiene un valor de 28,07dB, que se debe redondear a:

$$DL_R = 28dB$$

2.5. Clasificación del comportamiento de aislamiento

De acuerdo con lo establecido en la norma citada, las categorías normalizadas en función de DL_R son:

Categoría	DL_R (dB)
B_0	No determinado
B_1	$DL_R < 15$
B_2	15 a 24
B_3	25 a 34
B_4	$DL_R > 34$

Ambos valores obtenidos para el índice DL_R se encuentran en la categoría **categoría B3**. Este resultado cumple con la especificación buscada para el aislamiento acústico.

3. Medición de absorción sonora en cámara reverberante

3.1. Metodología de las mediciones

Para calcular la absorción sonora se deben medir los tiempos de reverberación siguiendo el procedimiento de la Norma IRAM 4065/1995 *Acústica. Medición de absorción de sonido en sala reverberante*.

La sala reverberante utilizada posee un volumen de 189 m³, una superficie interior de 208 m², y cumple con los requisitos de estas normas.

Durante el ensayo se utilizan 2 posiciones diferentes de las fuentes sonoras y 6 posiciones del micrófono, realizándose 3 registros por cada combinación fuente-micrófono. De este modo, cada tiempo de reverberación es el resultado del promedio de 36 caídas. Este procedimiento se lleva a cabo para dos condiciones: la cámara vacía y la cámara con la muestra ensayada en su interior.

Con los tiempos de reverberación medidos, se calcula el coeficiente de absorción sonora α_s (adimensional), para las bandas de tercios de octava comprendidas entre 100 y 5000 Hz; finalmente, a partir del α_s , se obtiene el valor del índice de evaluación de la absorción sonora DL_α , cuya expresión se analizará en la subsección correspondiente.

3.2. Valores medidos

Los paneles se colocaron sobre el piso de la cámara reverberante, con su cara fonoabsorbente hacia arriba, expuesta al sonido, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Montaje de ensayo en cámara reverberante.

En la Tabla de la Figura 8 se presentan los valores de tiempos de reverberación medidos para las distintas condiciones de ensayo.

Banda	TR Sala con muestra (T2)	TR Sala vacía (T1)
100	4,60	14,92
125	4,47	12,22
160	3,71	9,97
200	3,20	9,08
250	2,89	9,19
315	2,72	9,74
400	2,38	8,74
500	2,28	7,59
630	2,26	7,15
800	2,21	7,03
1000	2,28	7,21
1250	2,23	6,58
1600	2,21	5,87
2000	2,23	5,08
2500	2,22	4,44
3150	2,17	3,59
4000	2,08	2,98
5000	1,84	2,29

Figura 8: Tiempos de reverberación medidos, en segundos.

Se constató que la temperatura y la humedad permanecieran constantes durante el ensayo, y los valores registrados fueron: 26.7 °C y 62 %, respectivamente.

3.3. Análisis de las mediciones

Las mediciones del tiempo de reverberación de la sala se muestran en el siguiente gráfico:

Absorción sonora del fonoabsorbente Ensayo normalizado en cámara reverberante

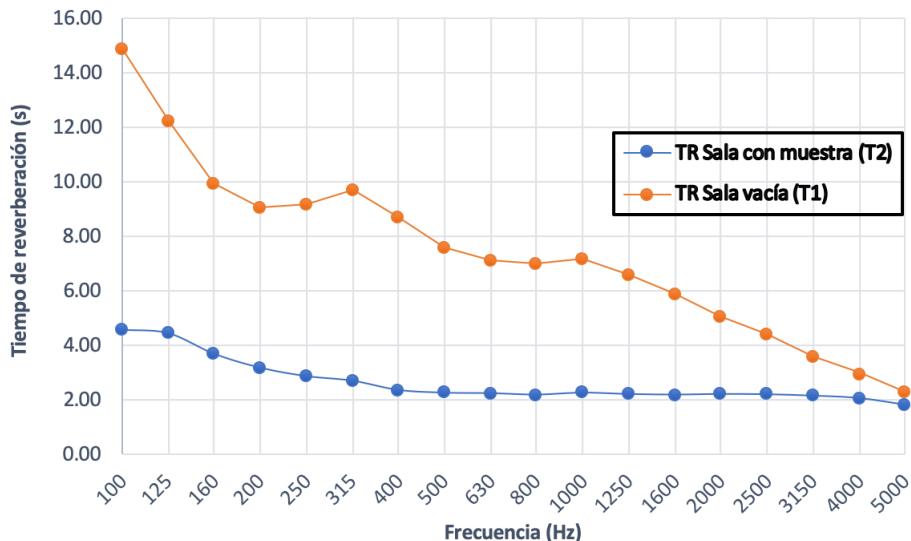


Figura 9: Tiempos de reverberación de la sala con y sin la muestra.

Observando ambas curvas, se puede notar que el tiempo de reverberación baja considerablemente ante la colocación de la muestra en la sala. La sala vacía cuenta con un tiempo de reverberación que varía desde los 14,92 segundos (aproximadamente) para las frecuencias más bajas, hasta los 2,29 segundos para las frecuencias más altas, lo que representa un parámetro muy variable. Al colocar la muestra, este tiempo no sólo se logra disminuir hasta en un 70 % para algunas frecuencias (para 100 Hz y 315 Hz, por ejemplo), sino que también se lo puede apreciar con un carácter más constante a lo largo de cada banda, acotando su valor entre un mínimo de 1,84 segundos y un máximo de 4,60 segundos.

Para proceder a obtener el coeficiente de absorción, se debe calcular antes el parámetro del área equivalente de absorción del material, en m^2 :

$$A_{eq} = 55,3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{TR_1} - \frac{1}{TR_2} \right) \quad (7)$$

La velocidad del sonido varía con la temperatura según $c = 332 + 0.608T$. Usando el dato mencionado de $T = 26.7^\circ\text{C}$, se calcula $c = 348.23 \text{ m/s}$. V es el dato del volumen de la cámara utilizada (189 m^3). TR_1 y TR_2 es el tiempo de reverberación de la cámara vacía y con la muestra, respectivamente, para cada banda de frecuencias.

Finalmente, el coeficiente de absorción del material en función de la frecuencia es:

$$\alpha_s = \frac{A_{eq}}{S} \quad (8)$$

S es el valor de la superficie del material a caracterizar; en este caso: $S = 10 \text{ m}^2$.

A partir del cálculo de las expresiones anteriores con los datos medidos, se obtiene el coeficiente de absorción sonora para cada banda de tercios de octava de frecuencia.

Banda	TR Sala con muestra (T2)	TR Sala vacía (T1)	Área equivalente	Coeficiente de absorción (alpha)
100	4,60	14,92	4,51	0,45
125	4,47	12,22	4,26	0,43
160	3,71	9,97	5,08	0,51
200	3,20	9,08	6,07	0,61
250	2,89	9,19	7,12	0,71
315	2,72	9,74	7,95	0,80
400	2,38	8,74	9,18	0,92
500	2,28	7,59	9,21	0,92
630	2,26	7,15	9,08	0,91
800	2,21	7,03	9,31	0,93
1000	2,28	7,21	9,00	0,90
1250	2,23	6,58	8,90	0,89
1600	2,21	5,87	8,47	0,85
2000	2,23	5,08	7,55	0,76
2500	2,22	4,44	6,76	0,68
3150	2,17	3,59	5,47	0,55
4000	2,08	2,98	4,36	0,44
5000	1,84	2,29	3,21	0,32

Figura 10: Datos numéricos obtenidos para el coeficiente de absorción para cada banda de frecuencia.

Los resultados se exponen en el siguiente gráfico, cuyos datos son los de la tabla 10:

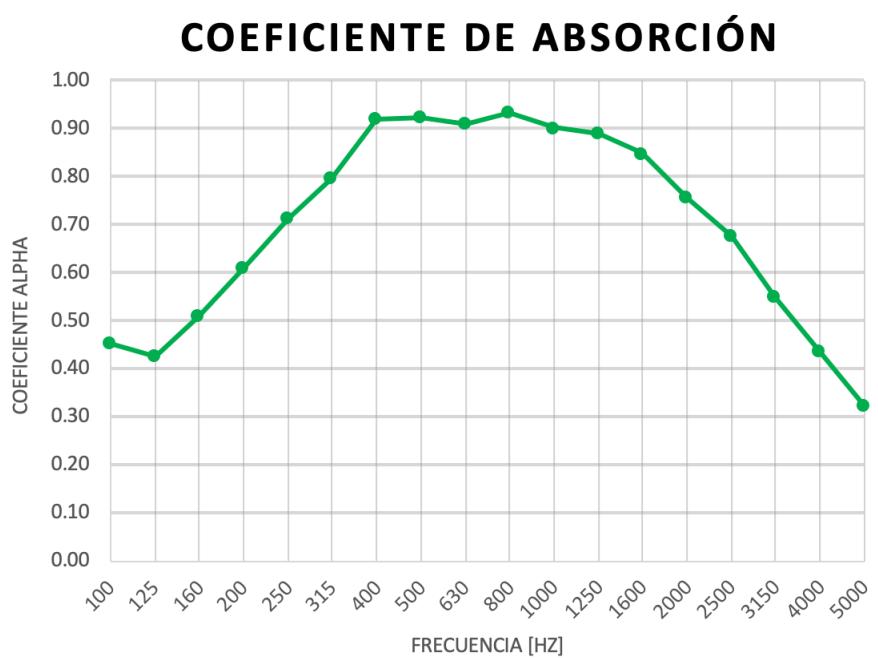


Figura 11: Coeficiente de absorción para cada banda de frecuencia.

Observando el gráfico de la Figura 11, se puede concluir en que el material absorbe *casi* la totalidad del sonido (más del 90 %) para las frecuencias comprendidas entre los 400 y 1250 Hz.

Para frecuencias fuera de ese rango, absorbe entre un 32 % y un 85 %.

3.4. Índice de evaluación de la absorción sonora ($D L_\alpha$)

A partir de los valores del coeficiente de absorción sonora α_s , dependientes de la frecuencia, y siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 4065/1995: *Acústica. Medición de absorción de sonido en sala reverberante*, se obtiene el número global: este índice es calculado como la diferencia de niveles de presión sonora ponderados A, mediante la siguiente ecuación, expresada en decibeles, y se redondea al entero más próximo:

$$DL_\alpha = -10 \log \left(1 - \frac{\sum \alpha_{s,i} 10^{0,1 L_i}}{\sum 10^{0,1 L_i}} \right) \quad (9)$$

Donde:

- $\alpha_{s,i}$: Coeficiente de absorción sonora de la i-ésima banda de tercio de octava;
- L_i : Nivel de presión sonora de ruido normalizado ponderado A, en dB, de la i-ésima banda de tercio de octava del ruido normalizado que corresponda utilizar.

$$DL_\alpha = -10 \log \left(\frac{\sum 10^{0,1 L_i} - \sum \alpha_{s,i} 10^{0,1 L_i}}{\sum 10^{0,1 L_i}} \right) \quad (10)$$

$$DL_\alpha = 10 \log \left(\sum 10^{0,1 L_i} \right) - 10 \log \left(\sum 10^{0,1 L_i} - \sum \alpha_{s,i} 10^{0,1 L_i} \right) \quad (11)$$

Observando la última expresión, se puede decir que este índice corresponde a una resta energética entre el nivel de presión sonora de ruido normalizado ponderado A y el sonido absorbido por el material en cuestión. Luego vemos los casos límites:

- Si el coeficiente de absorción se acerca a 0, el índice tenderá a valer 0;
- Si el coeficiente de absorción tiende a 1, el argumento del logaritmo del segundo término tiende a 0, lo que lleva a un índice que tiende a infinito.

Teniendo en cuenta el espectro normalizado para el ruido de tráfico, se calcula siguiendo la expresión dada y se obtiene un valor de 7,35 dB, que se debe redondear a:

$$DL_\alpha = 7dB$$

Para el caso del ruido ferroviario, el cálculo es de 6,48dB, que se debe redondear a:

$$DL_\alpha = 6dB$$

3.5. Clasificación del comportamiento de absorción

De acuerdo con lo establecido en la citada norma, las categorías normalizadas en función de $D L_\alpha$ son:

Ambos valores obtenidos para el índice $D L_\alpha$ se encuentran en la categoría **categoría A2**. Este resultado **no** cumple con la especificación buscada para el aislamiento acústico. Para cumplir con la especificación, el $D L_\alpha$ calculado debía estar entre los 8 y 11 dB.

Categoría	DL_α (dB)
A_0	No determinado
A_1	$DL_\alpha < 4$
A_2	4 a 7
A_3	8 a 11
A_4	12 a 15
A_5	$DL_\alpha > 15$

4. Conclusiones: análisis de los resultados obtenidos

A partir de las mediciones realizadas, se llegó a caracterizar los paneles en las siguientes categorías:

Característica	Requerimiento	Especificación alcanzada
Aislamiento al ruido aéreo	Categoría B3	Categoría B3
Absorción sonora	Categoría A3	Categoría A2

Como ya se concluyó en las correspondientes secciones, los paneles ensayados cumplen sólo con uno de los dos requerimientos, por lo que no pueden considerarse aptos para ser usados en la obra.

Por otro lado, si se la instalara en una autopista, y los requerimientos acústicos fuesen los mismos que para la obra ferroviaria, habría que tener en cuenta el ESPECTRO NORMALIZADO DE RUIDO DE TRÁNSITO, definido en la norma UNE-EN 1793-3, en lugar del ESPECTRO NORMALIZADO DE RUIDO FERROVIARIO, definido en la norma UNE-EN 16272-3. Esto se realiza para respetar la norma UNE-EN 1793-2, en donde se establece que el espectro de ruido normalizado a utilizar en el cálculo de los parámetros globales depende del uso al que estén destinados. Como se mostró para los cálculos de los índices, se ve que utilizando el espectro de ruido de tráfico, los paneles corresponden a la misma categoría, a pesar de haber una leve variación en el valor del índice calculado. También se puede decir que el ruido de tráfico rodado tiene más componentes graves que el de los ferrocarriles, porque en éste último hay una rueda de metal con vías de metal.

Para el caso de la absorción sonora, la muestra cambia de categoría; por esta razón, se podría concluir en que la barrera estudiada no tiene el mismo comportamiento frente a los dos tipos de ruido (de tráfico y ferroviario).