

## ANÁLISIS DEL INCREMENTO DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA DEBIDO A LA COLOCACIÓN DEL MATERIAL

PACS: 43.55.Ev

Caballol Bartolomé, David <sup>1</sup>; Pérez Raposo, Álvaro <sup>2</sup>.

Universidad Politécnica de Madrid. ETS Edificación.

<sup>1</sup> Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control

<sup>2</sup> Departamento de Matemática Aplicada

Avda. Juan de Herrera 6

28040 Madrid

España

Tel: +0034 913367611

david.caballol@upm.es

**Absorción; Materiales de Construcción; Separación entre piezas.**

### ABSTRACT

It's presented the results of tests performed in a standardized reverberation room measuring reverberation time with different acoustic absorbent materials in different layouts, compared to those results where the same material was placed as a single place.

With the analysis of data, a regression model is established in order to predict, for certain frequencies, the improvement produced in the reverberation time, using the same amount of material by placing it in pieces separated from each other, instead of in one piece.

### RESUMEN

Se presentan los resultados de ensayos de tiempo de reverberación en cámara reverberante con diferentes materiales absorbentes colocados con distintas disposiciones. comparándose los resultados obtenidos con la misma cantidad de material colocados en una única pieza y en piezas separadas.

Se establece un modelo que predice, para determinadas frecuencias, el incremento del tiempo de reverberación a causa de la colocación en trozos separados en vez de colocarlos en una única pieza.

### INTRODUCCIÓN

La estrategia más utilizada para limitar el ruido reverberante en el interior de un recinto es incluir una cierta cantidad de material absorbente en una o más superficies.

Estas estrategias de acondicionamiento acústico se usan debido a la simplicidad de cálculo y su relativamente sencilla ejecución.

Muchas de las regulaciones acústicas europeas incluyen limitaciones de tiempo de reverberación con respecto al uso y el volumen del recinto o locales. Otros países reemplazan el requisito por uno en la cantidad calculada del área de absorción equivalente aplicada. [1,2]

La gran mayoría de estas regulaciones basan sus prescripciones en la muy conocida ecuación de Sabine [3]

Las limitaciones de la fórmula de Sabine han sido claramente reconocidas [4] y se han propuesto varias formulaciones que pretenden mejorarla. Los más celebrados son ligeras modificaciones de la ecuación de Sabine [3], como las propuestas por Eyring [5] o las de Millington y Sette [6], que consideran diferentes formas de introducir el coeficiente de absorción dentro de las ecuaciones. También hay intentos de modelar el tiempo de reverberación con el campo de sonido no difuso, como la ecuación de Fitzroy [7] o la ecuación de Arau [8]. Es bien sabido que todas estas formulaciones consideran solo dos propiedades de cada superficie absorbente, a saber, su coeficiente de absorción, que es una propiedad intrínseca del material, y el área superficial. Por lo tanto, no pueden distinguir el efecto de diferentes diseños de la misma cantidad de material absorbente.

Sin embargo, la absorción adicional que se produce cuando el material absorbente se coloca en trozos separados entre sí en lugar de en una única pieza ha sido ampliamente documentado [9-13] y se ha atribuido a la difusión del sonido y al denominado efecto de borde. En el primer caso, algunos estudios de investigación [14,15] han intentado cuantificar la difusión en función del coeficiente de dispersión y el coeficiente de absorción de las paredes. También es conocido y se estudia ampliamente [11,12,16] que el efecto de borde aumenta la absorción medida en una cámara de reverberación debido, entre otras causas, a la superficie adicional que puede estar presente debido al espesor de la muestra bajo prueba.

Otros investigadores han estudiado un problema similar [10, 9, 17,18] pero ninguno de ellos ha presentado un método simple que pueda predecir el efecto sobre el tiempo de reverberación en una habitación, utilizando la misma cantidad de material absorbente por el simple hecho de colocarlo en piezas separadas entre sí.

Colocar el material absorbente en parches es hoy en día, una situación común en obras de construcción, y sin embargo no se ha encontrado una formulación simple que pueda ser de uso directo, para que se pueda aplicar por un técnico en obra, de la influencia de la colocación del material en el tiempo de reverberación.

El objetivo de esta comunicación es proporcionar dicho modelo predictivo, y definir bajo qué condiciones es posible aplicarlo.

Para ello, hemos medido los tiempos de reverberación en cámara reverberante con muestras de diferentes materiales en diferentes diseños: en una sola pieza, así como en trozos con una variedad de espacios de separación entre ellos.

## METODOLOGÍA

El tiempo de reverberación ha sido medido en las condiciones especificadas por la norma ISO 354 [19] para la medición del coeficiente de absorción de un material absorbente. El método descrito en esta norma obtiene el tiempo medio de reverberación en la sala de reverberación con y sin la muestra de prueba.

Las condiciones del ensayo prescriben un tamaño y forma de sala de reverberación determinada, con temperatura y humedad controladas. La muestra de prueba debe tener un área entre 10 y 12 m<sup>2</sup> y debe ser de forma rectangular con una relación de anchura a longitud entre 0.7 y 1.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Hemos medido el tiempo de reverberación en bandas de tercios de octavas de tres materiales diferentes con espesor similar y en diferentes posiciones.

Los materiales que se han probado han sido:

- Material nº1 (M1): fibra de poliéster no tejida de 30 mm de espesor, presentada en tabloncillos rígidos de dimensiones 1000 x 500 x 30 mm y con una densidad de 30 kg/mm<sup>3</sup>.
- Material nº2 (M2): lana de roca de 30 mm de espesor, en tabloncillos rígidos con dimensiones 1000 x 600 x 30 mm y 100 kg/mm<sup>3</sup> de densidad.
- Material nº3 (M3): espuma de melamina de 30 mm de espesor, presentada en tabloncillos rígidos de dimensiones 1000 x 500 x 30 mm y con una densidad de 10 kg/mm<sup>3</sup>.



Imagen 1: Ensayo en cámara reverberante

Primero, se ensayan los materiales en una sola pieza y se obtiene el tiempo de reverberación en cada caso, y luego con los mismos materiales distribuidos en trozos con separaciones controladas entre ellos. Las muestras utilizadas tienen un área neta de 10 m<sup>2</sup> (en una sola pieza), aumentando el área bruta a través de la superficie de separación entre las piezas en las diferentes posiciones ensayadas. Como las piezas están separadas, para cada caso, comparamos el espacio ocupado por el material absorbente y los huecos que quedan cuando las piezas se distancian gradualmente. De esta forma, se obtienen resultados diferentes para el 100% de la superficie ocupada (caso una sola pieza), 86%, 75%, 51% y 37% del área ocupada por el material. Esta relación entre el área neta y el área bruta es la variable a la que nos referimos con el nombre de “ocupación” en la presente comunicación. Las muestras de prueba son inicialmente de forma rectangular, con una relación ancho / largo de 0,7 y se colocan de tal manera que cada pieza está distanciada más de 1 m de los bordes de la sala reverberante.

En todos los ensayos se permitió que las muestras alcanzaran un equilibrio entre la temperatura y la humedad relativa de la sala de reverberación antes de realizar cada ensayo. La humedad relativa de la cámara varió de 38 % a 39 % durante las pruebas y la temperatura entre 19.9 y 20.6 grados Celsius. El método de señal de ruido interrumpido se usó para medir el tiempo de reverberación y las curvas de caída de sonido se midieron en niveles equivalentes (usando promedio lineal) con tiempos de integración que varían entre 20 milisegundos para las bandas de tercio de octava en las frecuencias de 100, 125 y 160 Hz y 10 milisegundos para las bandas de frecuencia restantes. Las lecturas se realizaron en todos los

casos, en bandas de tercio de octava, como se especifica en el estándar ISO 266 [20]. En la imagen nº 1 se puede apreciar un momento del experimento descrito.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Como las separaciones entre los trozos del material van desde 10 cm hasta menos de 1 m, cabe esperar que las ondas correspondientes a las frecuencias medias y bajas apenas noten los diferentes diseños de los materiales absorbentes debido a sus largas longitudes de onda. Por el contrario, el efecto debería ser notable en las bandas de alta frecuencia. Otro efecto que podría esperarse en los resultados es el denominado efecto de área para frecuencias de 500 Hz o inferiores, porque el tamaño de los parches (del orden de 1 m) es similar a las longitudes de onda de esas frecuencias. Sin embargo, Kawai y Meotoiwa [21] han demostrado que con respecto al efecto de área, la disposición del material absorbente en una o varias piezas es irrelevante. Por lo tanto, y dado que el área neta de material absorbente se mantiene invariable durante todo el experimento, los resultados obtenidos serán más afectados por el efecto de borde en vez de por el efecto de área.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la cámara reverberante se presentan para en la siguiente tabla para cada banda de tercio de octava, cada material y cada nivel de ocupación en la Tabla 1.

Freq. (Hz)	Material 1					Material 2					Material 3				
	100%	86%	75%	51%	37%	100%	86%	75%	51%	37%	100%	86%	75%	51%	37%
100	3.29	3.42	3.17	3.56	3.25	4.18	3.06	3.54	3.51	3.59	3.66	4.22	3.72	4.62	3.41
125	4.41	4.01	4.14	3.77	3.70	4.55	4.19	4.20	4.06	3.92	4.20	4.33	4.22	5.40	4.59
160	3.20	3.76	4.14	3.61	3.39	3.81	4.19	3.75	3.25	4.01	3.40	4.13	3.94	4.12	4.24
200	3.26	2.81	2.74	2.92	3.30	2.73	2.68	3.38	2.78	2.54	3.93	3.22	3.73	3.05	3.94
250	3.34	4.06	3.58	3.59	2.97	3.66	3.16	3.30	4.24	3.06	3.83	3.64	3.39	3.33	2.93
315	2.95	3.29	2.91	3.17	3.57	2.69	2.87	3.31	2.62	2.64	3.18	3.08	3.37	3.11	2.91
400	2.71	3.28	2.97	3.25	2.89	2.39	2.40	2.72	2.89	2.35	2.86	2.60	2.58	2.69	2.91
500	2.68	2.68	2.80	2.48	2.80	2.25	2.12	2.16	2.48	2.17	2.58	2.63	2.47	2.61	2.46
630	2.56	2.73	2.78	2.33	2.70	2.03	2.15	2.19	1.95	1.83	2.41	2.45	2.40	2.51	2.21
800	3.09	2.73	2.68	2.54	2.72	2.45	2.17	2.20	2.04	1.99	2.37	2.30	2.40	2.12	2.19
1000	2.83	2.63	2.55	2.42	2.63	2.12	2.16	2.12	1.90	1.98	2.43	2.29	2.15	2.20	1.98
1250	2.75	2.51	2.50	2.40	2.43	2.14	2.20	2.07	1.95	2.01	2.48	2.22	2.13	2.09	2.07
1600	2.55	2.44	2.42	2.31	2.49	2.15	2.06	2.01	1.92	1.96	2.26	2.24	2.17	2.03	2.00
2000	2.37	2.30	2.26	2.22	2.26	2.08	2.02	2.03	1.92	1.86	2.26	2.12	2.10	2.02	2.03
2500	2.20	2.10	2.08	2.07	2.13	2.02	1.91	1.92	1.79	1.81	2.08	2.00	1.99	1.93	1.98
3150	2.01	1.89	1.94	1.86	1.91	1.85	1.76	1.73	1.76	1.65	1.88	1.82	1.80	1.75	1.82
4000	1.70	1.68	1.70	1.69	1.66	1.60	1.59	1.60	1.57	1.52	1.66	1.61	1.61	1.58	1.60
5000	1.41	1.41	1.40	1.39	1.35	1.33	1.32	1.37	1.31	1.24	1.44	1.34	1.33	1.29	1.35

Tabla 1: Tiempo de reverberación en segundos.

Para analizar estos datos, hemos realizado varios análisis estadísticos sobre ellos con la intención de determinar si el tiempo de reverberación medido depende del nivel de ocupación del material absorbente y, en caso afirmativo, de estimar un modelo de esta dependencia. Al mismo tiempo, también se analiza si el resto de variables son factores que deben considerarse.

Los datos expresados en la Tabla 2 son el resultado de un diseño factorial completo con tres factores: la frecuencia, con dieciocho niveles (de 100 Hz a 5000 Hz); el material, con tres niveles (M1, M2 y M3) y la ocupación, con cinco niveles (37 %, 51 %, 75 %, 86 % y 100 %). En cada uno de los  $18 \times 3 \times 5 = 270$  casos tenemos un dato medido.

Factor	Sum of squares	Deg. of freedom	Variance	F value	p-value
Frequency	159.12	17	9.36	139.2	0.0000
Material	3.02	2	1.51	22.5	0.0000
Occupation	0.56	4	0.14	2.1	0.0844
Residuals	16.52	246	0.07		
Total	179.22	269	0.67		

Tabla 2: Tabla anova para el diseño factorial de la tabla 1

El análisis estadístico realizado se ha dividido en tres pasos.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

- Paso 1: Se evalúa el efecto global de cada uno de los tres factores mencionados anteriormente, y los resultados indican (como era esperable) que la frecuencia es el factor más relevante para explicar el tiempo de reverberación, mientras que los efectos del material o la ocupación apenas se distinguen del azar o variabilidad no controlada.
- Paso 2: El análisis estudia cada frecuencia por sí misma. Y los resultados obtenidos nos obligan a considerar solo las altas frecuencias, ya que en el resto de los casos el efecto del material y la ocupación son evidentes.
- Paso 3: En el tercer paso, intentamos, y lo logramos, construir un modelo para predecir el tiempo de reverberación dependiente de la variable de ocupación.

Paso 1: Análisis global de la varianza.

En este paso, hemos considerado los tres factores (frecuencia, material y ocupación) como variables cuantitativas, ya que nuestra única preocupación en esta etapa es medir su importancia relativa para explicar los datos. Los resultados del análisis de la varianza realizada en los datos se muestra en la Tabla 2, que contiene las sumas de cuadrados asociadas a cada uno de los factores, así como la variabilidad no explicada por ellos.

Desafortunadamente, no podemos confiar en los resultados obtenidos porque el diagnóstico del modelo revela que la hipótesis del análisis de la varianza no se cumple.

La Figura 2 muestra un diagrama de dispersión de los residuos y una trama Q-Q normal para probar la normalidad. La gráfica de dispersión señala una clara falla de la hipótesis de homocedasticidad y la segunda trama un error en la hipótesis de normalidad de los residuos. Estos hechos, nos obligan a realizar una transformación de los datos para obtener resultados confiables.

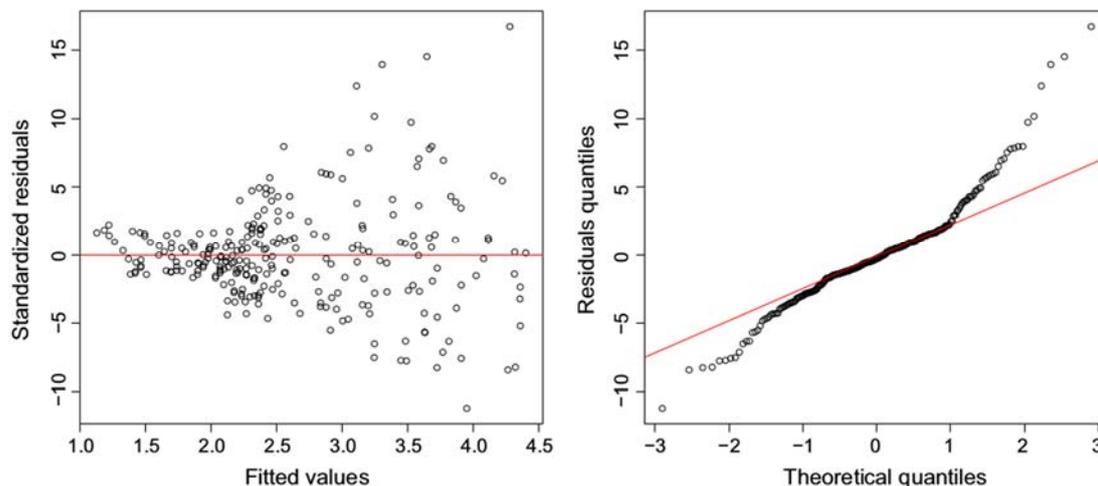


Figura 2: Diagramas de diagnóstico del análisis de varianza realizado en los datos de la Tabla 1.

La figura de la izquierda es una gráfica de dispersión de los residuos con respecto a los valores ajustados, que muestra una heterogeneidad inadmisibles de la varianza. La figura de la derecha es una gráfica Q-Q normal de los residuos, que muestra en sus extremos la falta de normalidad.

Una transformación que ha funcionado bien es obtener las inversas de los tiempos de reverberación. Dado que solo estamos preocupados, en esta etapa, sobre la importancia

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

relativa de cada factor, es irrelevante si el análisis se realiza con la variable T o su inversa. Ahora, el resultado del análisis de la varianza en el inverso de los datos se resume en la Tabla 3. El diagnóstico de este segundo análisis de varianza puede ser visto en la Figura 3 que muestra una mejora en la homocedasticidad de los residuales y, lo más notable, de la normalidad de su tributo. Una prueba de Kolmogorov-Smirnov de la normalidad de los residuos da el valor  $D = 0.0443$  para el estadístico, lo que significa un p-valor de 0.6651 para la prueba. Los resultados derivados de este análisis son, por lo tanto, confiables.

Factor	Sum of squares	Deg. of freedom	Variance	F value	p-value
Frequency	4.252	17	0.25010	293.7	0.0000
Material	0.116	2	0.05790	68.0	0.0000
Occupation	0.023	4	0.00573	6.7	0.0000
Residuals	0.209	246	0.00085		
Total	4.600	269	0.67		

Tabla 3: Tabla anova para el diseño factorial de la inversa de los datos de la tabla 1

En la Tabla 3 leemos que los tres factores tienen una estadística contribución significativa para explicar la variabilidad de los datos, para los tres dan pequeños valores críticos en el test-F. Sin embargo, al mirar la columna de sumas de cuadrados, vemos que la frecuencia explica por sí solo el 92.5% de la variabilidad total, mientras el material representa el 2.5% y la ocupación del 0.5% pero, en contraste, la variabilidad no explicada por el modelo plantea 4.5%. Por lo tanto, los efectos del material y la ocupación están enmascarados por la variabilidad debida a otros factores (aleatorios o no).

La conclusión final de este análisis es, por lo tanto, que para poder distinguir el efecto de la ocupación, debemos estudiar los datos separados por frecuencias. Este será nuestro segundo paso.

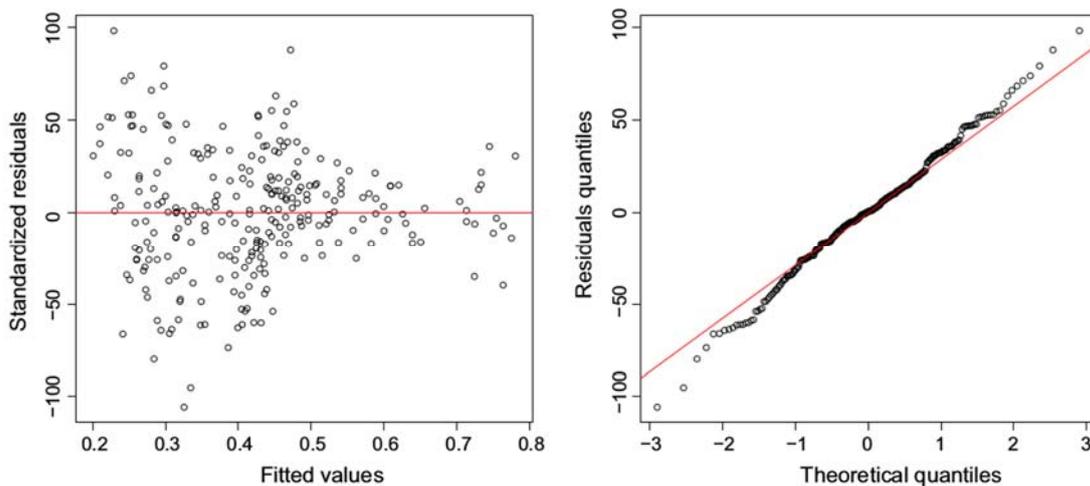


Figura 3: Diagramas de diagnóstico del análisis de varianza realizado en el inverso de los datos de la Tabla 1. La figura de la izquierda es un gráfico de dispersión de los residuales. La figura de la derecha es una gráfica Q-Q normal de los residuales, y que indica que está muy cerca de la normalidad.

Paso 2: Análisis de la varianza para cada frecuencia.

Consideramos los datos en la Tabla 1 para cada frecuencia y, por lo tanto, estudiamos dieciocho diseños factoriales con dos factores cada uno, el material y la ocupación. Hemos realizado un análisis de la varianza en cada uno de ellos para tratar de discernir el papel de cada factor para explicar la variabilidad observada. Los resultados son resumidos en la Tabla 4. Vale la pena mencionar que el diagnóstico de los dieciocho análisis de varianza se ha

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

demostrado correcto, tanto en homocedasticidad como en normalidad de los residuos. En cada caso, además de los gráficos de diagnóstico estándar, un la prueba de Shapiro-Wilk se ha aplicado a los residuos, con un resultado de p-valor mayor que 0.5 en todos los casos. Por lo tanto, podemos afirmar que todos los resultados son confiables.

Frequency	s.s. (material)	s.s. (occupation)	s.s. (residuals)	p-value (material)	p-value (occupation)
100	0.8748	0.4475	1.2313	0.1170	0.5980
125	0.7632	0.2580	1.2958	0.1570	0.8050
160	0.2996	0.6202	0.8472	0.2980	0.2990
200	1.5363	0.5053	0.8684	0.0170	0.3950
250	0.0187	1.0211	0.9998	0.9280	0.1810
315	0.3644	0.1242	0.6090	0.1530	0.7980
400	0.5631	0.1401	0.4188	0.0331	0.6314
500	0.5366	0.0054	0.1718	0.0035	0.9911
630	0.8871	0.1156	0.1533	0.0005	0.2871
800	0.9609	0.2835	0.0675	0.0000	0.0058
1000	0.8241	0.1691	0.0803	0.0000	0.0399
1250	0.5249	0.1883	0.0399	0.0000	0.0040
1600	0.4728	0.0958	0.0253	0.0000	0.0080
2000	0.2273	0.0711	0.0110	0.0000	0.0014
2500	0.1279	0.0468	0.0104	0.0000	0.0046
3150	0.0756	0.0299	0.0125	0.0000	0.0288
4000	0.0314	0.0062	0.0029	0.0000	0.0372
5000	0.0152	0.0118	0.0118	0.0365	0.1889

Tabla 4: Resultados del análisis de varianza con dos factores (material y ocupación) en cada una de las dieciocho frecuencias.

En la Tabla 4 es interesante comparar las sumas de cuadrados con la ocupación y los residuos. Para frecuencias hasta 630 Hz la suma de cuadrados de los residuos es mayor que el de la ocupación, o muy similar en el caso de 250 Hz. Por lo tanto, los p-valores de la ocupación son altos, (mayores a 0.05). En estos casos podemos afirmar que la ocupación no tiene un papel estadísticamente significativo en la explicación la variabilidad. De 800 Hz a 4000 Hz la suma de cuadrados de la ocupación es mayor que la de los residuos y los p-valores son lo suficientemente pequeños como para considerar que el factor afecta los datos.

Finalmente, en la última frecuencia en estudio, 5000 Hz, da una resultado inesperado, ya que las tres sumas de cuadrados son bastante similares, lo que conduce a p-valores no tan pequeños. En este caso, una observación pormenorizada de los datos muestra que en 5000 Hz casi no hay diferencia en la respuesta variando ya sea el material o el nivel de ocupación, por lo que el análisis estadístico parece correcto cuando señala que estos factores no afectan significativamente los datos.

La conclusión obtenida con este segundo paso es, ya que estamos interesados en el efecto de la ocupación en el tiempo de reverberación, que estamos obligados a restringir nuestro estudio a frecuencias iguales o superiores a 800 Hz.

Paso 3: Análisis de la covarianza.

No perdamos de vista que nuestro objetivo final es obtener un método predictivo sencillo que pueda ser utilizado de manera directa por un técnico en obra. De modo que seamos capaces de predecir numéricamente la dependencia del tiempo de reverberación de la variable llamada "ocupación".

La manera de conseguirlo es mediante un modelo de regresión, lo mas sencillo posible.

Para este fin, hemos utilizado las técnicas del análisis de covarianza [22-24] en los datos de cada una de las frecuencias a partir de 800 Hz.

Para cada frecuencia, se han probado varios modelos y tras la realización de varias pruebas estadísticas para testar su fiabilidad se ha llegado a la conclusión de que el modelo que mejor se ajusta a la predicción del tiempo de reverberación es el siguiente (Eq 1):

$$T = \mu + \alpha_i + \beta O + ei = 1,2,3(1)$$

Donde T es el tiempo de reverberación y O es la variable de ocupación expresada en tanto por 1.

Los parámetros de este modelo son  $\mu$ , un término de intersección,  $\alpha_i$  que representa el efecto del material y  $\beta$  es la pendiente. Adviértase que en este modelo la pendiente  $\beta$  es completamente independiente del material. Se supone que el error desconocido "e" se distribuye normalmente, con media cero y varianza  $r^2$ .

Es de destacar que este modelo ajusta mejor que otros modelos testados mucho más complejos. Como aquellos en los que la pendiente  $\beta$  se define como parámetro dependiente del material.

En la Tabla 5 mostramos la estimación para la pendiente  $\beta$ , con su error estándar, y la varianza de los residuos,  $s_R^2$ , para cada frecuencia. Esta tabla es el resultado principal de la investigación.

Frequency	$\beta$	$s_\beta$	$s_R^2$
800	0.52	0.13	0.11
1000	0.44	0.11	0.10
1250	0.44	0.09	0.08
1600	0.31	0.07	0.06
2000	0.29	0.04	0.04
2500	0.20	0.05	0.05
3150	0.16	0.05	0.04
4000	0.08	0.02	0.02
5000	0.12	0.04	0.03

Tabla 5: Pendientes,  $\beta$ , de los modelos de regresión para el tiempo de reverberación en función de la ocupación.

Las regresiones lineales definidas por la ecuación dependen del material, pero solo en el parámetro de intersección. Sin embargo,

nuestro objetivo es darle al modelo de la ecuación (1) una forma que sea útil independientemente del material. Se desea por tanto sustituir los parámetros  $\mu$  y  $\alpha_i$  por una propiedad del material que sea conocida y fácilmente utilizable. Para conseguirlo, consideramos la ecuación (1) con  $O = 1$ , es decir, con el material colocado en una sola pieza, y llamamos por  $T_1$  al tiempo de reverberación de este caso particular.

$T_1$  es por tanto el tiempo de reverberación del material colocado de una sola pieza, y podemos obtener este dato a través del coeficiente de absorción acústica ofrecido dentro de las especificaciones técnicas del fabricante para cada material y mediante el uso de la ecuación de Sabine [3]. Por lo tanto, podemos considerar  $T_1$  como incluido en la parte determinista del modelo.

Tenemos entonces que  $T_1 = \mu + \alpha_i + \beta$ . Despejando  $\mu + \alpha_i$  y sustituyendo nuevamente en la ecuación (1), obtenemos la siguiente ecuación (2) que relaciona el tiempo de reverberación y la variable "ocupación" donde la pendiente  $\beta$ , la misma que antes, se obtiene en la Tabla 5.

$$T = T_1 + \beta(O + 1)(2)$$

La ecuación (2) permite predecir, para frecuencias iguales o superiores a 800 Hz y en condiciones similares a los de nuestro experimento, la mejora en el tiempo de reverberación a partir del valor  $T_1$ .

## CONCLUSIONES

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

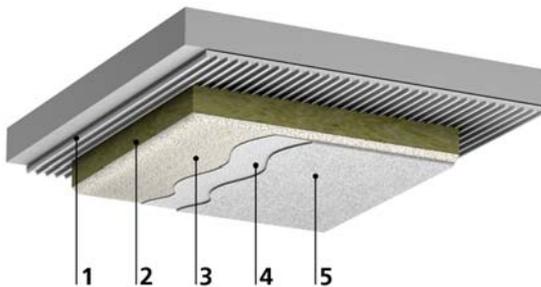
Mediante ensayos estandarizados en cámara reverberante, se ha obtenido el tiempo de reverberación en tercios de bandas de octava con tres materiales absorbentes diferentes con espesores similares y con diferentes diseños. Se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre la variable de tiempo de reverberación en el tercio de las bandas de octava de 800 a 5000 Hz, que se puede predecir con la ecuación

$$T = T_1 + \beta(O + 1)(2)$$

Donde:

- $T_1$  es el tiempo de reverberación del material colocado de una sola pieza y se puede obtener a través del coeficiente de absorción acústica y la ecuación de Sabine [3]
- $\beta$  es la pendiente cuyos valores son dados en la tabla 5.
- $O$  es el parámetro ocupación expresado como relación entre el área neta y el área bruta en tanto por 1.

La aplicabilidad de la ecuación está limitada por las condiciones de nuestro experimento: materiales porosos sin características de absorción de picos, condiciones de prueba similares (y en particular, sin capas de aire de tras ellos), y una relación de área neta a área gruesa que varía entre el 37 % y 100 %.



A modo de ejemplo, en la imagen 2 se muestra un producto comercial concreto que podría cumplir con las condiciones referidas.

Imagen nº 2: Ejemplo concreto de posible aplicabilidad con un producto comercial de la empresa STO e indicación de sus partes.

1. Adhesivo; 2. Junta visible; 3. Panel acústico; 4. Capa intermedia (de adherencia); 5: Acabado fotocatalítico.

Si se desea utilizar una regla empírica, se puede observar que los valores de la pendiente  $\beta$  para cada una de las tres frecuencias en la banda de octava de 1000 Hz son compatibles entre sí. Por lo tanto, como una aproximación, el promedio de estos tres valores se puede considerar como un valor común para las frecuencias en esta banda de octava. Lo mismo se aplica a los valores de las tres frecuencias en la banda de octava de 2000 Hz, y también es admisible en la banda de octava de 4000 Hz.

Los valores promedios mencionados de la pendiente en cada banda de octava son los siguientes.

Octave band	$\beta$
1000	0.47
2000	0.27
4000	0.12

Tabla 6: Pendientes promedio,  $\beta$ . Estos valores son solo aproximados y dados como una regla de oro para la aplicación de la ecuación (2)

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Son valores promedio y por tanto aproximados y se dan como valores necesarios para establecer una regla general para la aplicación de la ecuación (2).

Para las frecuencias más bajas, se ha demostrado que la relación entre el área neta y el área bruta del material (ocupación variable) no es una variable estadísticamente significativa que pueda servir para explicar el tiempo de reverberación. En bajas y medias frecuencias la variabilidad obtenida al intentar las predicciones es muy alta debido a otros factores y, por lo tanto, el efecto de la ocupación en estas bandas de frecuencia se enmascara. Este resultado coincide con lo esperado, ya que la elevada longitud de onda correspondiente a las frecuencias medias y bajas, dificulta que noten la diferente disposición de los materiales.

La solidez del modelo propuesto se ha demostrado estadísticamente y por tanto, la ecuación anterior se considera un método simple y de confianza para predecir la mejora producida en el tiempo de reverberación en una habitación de las características probadas, usando la misma cantidad de material pero colocada en trozos separados uno del otro en lugar de en una sola pieza para determinadas frecuencias.

## REFERENCIAS

- [1] Rasmussen B, Brunskog J, Hoffmeyer D. Reverberation time in classrooms –comparison of regulations and classification criteria in the Nordic countries. In: Proceedings of joint Baltic-Nordic acoustics meeting BNAM2012. p. 1–6.
- [2] COST Action TU0901, Copenhagen. Towards a common framework in building acoustics throughout Europe; 2013.
- [3] Sabine WC. Collected papers on acoustics. Cambridge: Harvard University Press; 1923. p. 3–68 [Ch. Reverberation].
- [4] Alton F, Pohlmann K. Reverberation. Master handbook of acoustics. 5th ed. McGraw-Hill; 2009.
- [5] Eyring C. Reverberation time in dead rooms. *J Acoust Soc Am* 1930;1:217–41.
- [6] Millington G. A modified formula for reverberation. *J Acoust Soc Am* 1932;4:69.
- [7] Fitzroy D. Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption. *J Acoust Soc Am* 1959;31:893.
- [8] Arau-Puchades H. An improved reverberation formula. *Acustica* 1988;65:163–80.
- [9] Chrisler V. Dependence of sound absorption upon the area and distribution of the absorbent material. *J Res Natl Bur Stand* 1934;13:169–87.
- [10] Cook R. Absorption of sound by patches of absorbent material. *J Acoust Soc Am* 1957;29:324–9.
- [11] Bruijin A. Calculation of edge effect of sound absorbing structures. PhD thesis. Delft, Holland; 1967.
- [12] Guicking D. Theoretical evaluation of the edge effect of an absorbing strip of a pressure-release boundary. *Acustica* 1990;70:66–75.
- [13] Trevor J, D'Antonio P. Acoustics absorbers and diffusers. New York: Taylor & Francis; 2009. p. 388–93 [Ch. Hybrid surfaces].
- [14] Hanyu A. Theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls. *J Acoust Soc Am* 2010;128:1140–8.
- [15] Omoto A. Comment on a theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls. *J Acoust Soc Am* 2013;133:9.
- [16] Kawakami F. Deep-well approach for cancelling the edge effect in random incident absorption measurement. *J Acoust Soc Jpn* 1998;19:327–38.
- [17] Thomasson S. Theory and experiments of the sound absorption as function of the area. Report TRITA-TAK8201. Stockholm: Dept of Acoustics, Royal Institute of Technology; 1982.



## FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

- [18] Jeong C. Converting Sabine absorption coefficients to random incident absorption coefficients. *J Acoust Soc Am* 2013;133:3951
- [19] ISO 354:2003, Geneva, Switzerland. Acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room; 2015.
- [20] ISO 266:1997, Geneva, Switzerland. Acoustics – preferred frequencies; 2013.
- [21] Kawai Y, Meotoiwa H. Estimation of the area effect of sound absorbent surfaces by using a boundary integral equation. *Acoust Sci Technol* 2005;26:123–7.
- [22] Peña D. Regresión y diseño de experimentos. Madrid: Alianza Editorial; 2002.
- [23] Weisberg S. Applied linear regression. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1985.
- [24] Yan X, Gang Su X. Linear regression analysis. Singapore: World Scientific; 2009.