juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

Absorción acústica – Concepto, medidas e indicadores ponderados

Juan Negreira
Dr. Ingeniero Acústico, *Concept Developer* (Saint-Gobain Ecophon España)

Cuando una onda sonora impacta una de las superficies de una habitación (pared, techo o suelo), parte de la energía sonora se refleja a la estancia de nuevo, y otra parte penetra en la superficie. Una parte de la energía que penetra es absorbida, convirtiéndose en energía calorífica (la cantidad dependiendo del material en cuestión), y el resto se transmite a otras estancias (ver Fig.1).

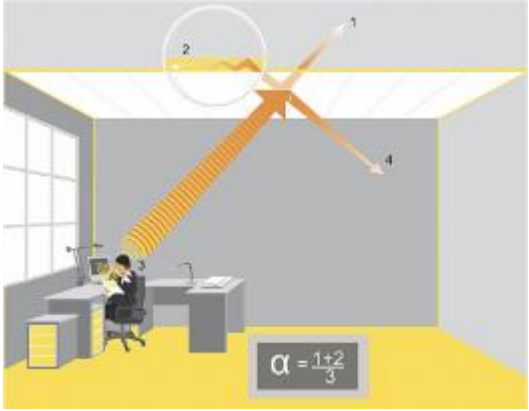


Fig.1. Energía incidente en un techo (3), que a su vez se divide en energía reflejada (4), absorbida (2), y energía transmitida (1). El coeficiente de absorción (denotado por la letra griega alpha – *α) es el porcentaje de energía absorbida con respecto al incidente.*

Tiempo de reverberación – Definición

Todos asociamos este parámetro con el eco, pero… ¿qué significa realmente? El tiempo de reverberación se define en la norma ISO 3382-1 [1] como el tiempo que tarda (en segundos) un sonido en disminuir su nivel de ruido en 60 dB después de que la emisión de la fuente se haya detenido. El tiempo de reverberación se mide más comúnmente, por razones prácticas, a través de una decaída de 20 o 30 dB (denotado T_{20} y T_{30}), 5 dB después de que cese el ruido, y luego se extrapola al rango completo de 60 dB (denotado T_{60}), ver Fig.2.

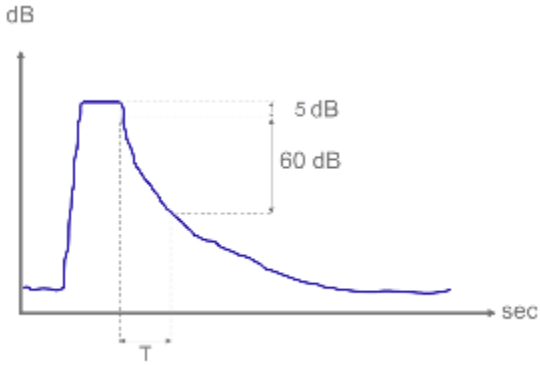


Fig.2: Representación gráfica del tiempo de reverberación (T, en segundos),.

En resumen, el tiempo de reverberación nos informa sobre cuánto tiempo permanecen los sonidos en una habitación antes de desaparecer. Es, tradicionalmente, el parámetro más importante a la hora de acondicionar acústicamente un recinto (y el único parámetro regulado actualmente en el Código Técnico de la Edificación DB-HR). Así, un tiempo de reverberación demasiado elevado, puede dificultar la comunicación y difuminar el mensaje debido a la acumulación de ruido en la sala y su manera de interactuar con la energía presente en los sonidos del habla –vocales y consonantes. El TR varía para cada frecuencia, y se calcula según la ley de Sabine, como se verá más adelante.

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

Medida del coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción de sonido de un material se mide siguiendo el método de ensayo expuesto en el estándar internacional EN ISO 354 [2]. El estándar equivalente americano es el ASTM C 423 [3]. Aunque en términos generales los dos anteriores estándares son parecidos, existen algunas diferencias en cuanto, por ejemplo, al tamaño del espécimen testado (el americano exige un mínimo de superficie a medir de 60 pies^2 –5.57 m^2, mientras que el ISO requiere entre 10 y 12 m^2 de material), a la habitación en la que se realiza el ensayo, a cómo realizar las mediciones, etc. que se detallan en la Tabla 1 al final del artículo.

Las mediciones se hacen idealmente en una cámara reverberante que asegura la existencia de un campo difuso (es decir, que el sonido tiene ángulos de incidencia distribuidos de manera uniforme contra la superficie del objeto a medir). El área del material absorbente a medir tiene que ser suficiente para que las medidas produzcan datos relevantes. Así, lo que se hace es medir el tiempo de reverberación a diferentes frecuencias; primero con la habitación vacía, y también después de introducir el material en la sala. La diferencia entre los resultados de estas dos medidas viene marcada única y exclusivamente (ya que todos lo demás parámetros se mantienen constantes) por la absorción del material del que se quiere conocer el coeficiente de absorción (ver Fig.3).

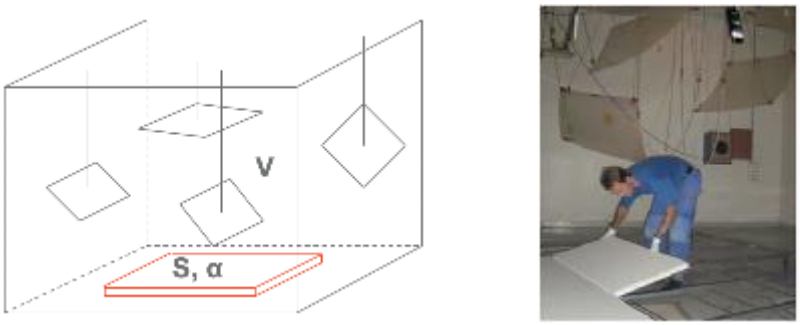


Fig.3. Esquema de la cámara reverberante con difusores colgando (para asegurar la presencia de un campo difuso) y el material -en rojo- que se va a medir (izquierda); y una foto de un operario de laboratorio preparando el test según la norma ISO 354 (derecha).

Sabiendo que el tiempo de reverberación T_{20}[seg] se calcula según la ley de Sabine como T_{20}=0.16·(V/A), donde V[m^3] es el volumen de la cámara donde se realizan las medidas, y A[m^{2}Sabine] es el área efectiva de absorción del material, la diferencia entre los dos tiempos de reverberación $T_{20,\text{SinMaterial}}$ y $T_{20,\text{ConMaterial}}$ nos permite determinar la diferencia en absorción ΔA[m^{2}Sabine]:

$$\Delta A = A_{\text{ConMaterial}} - A_{\text{SinMaterial}} = \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_{20,\text{ConMaterial}}} - \frac{0.16 \cdot V}{T_{20,\text{SinMaterial}}}\right)$$

El área de absorción equivalente ΔA, y por lo tanto, el tiempo de reverberación, dependen de la frecuencia (es decir, un material puede absorber diferente a diferentes frecuencias –normalmente longitudes de onda largas –sonidos graves- se absorben peor que cortas –sonidos agudos). Una vez obtenida la diferencia de área efectiva de absorción ΔA[m^{2}Sabine], el coeficiente de absorción práctico α_p se calcula usando la relación entre la absorción y la superficie física S[m^2] del material que se ha usado durante el test, según la relación:

$$\alpha_s(f) \approx \alpha_p(f) = \frac{\Delta A\,(f)}{S}$$

Así, el resultado de este ensayo es una curva que nos da el coeficiente de absorción medido α_s. Este coeficiente se convierte y ajusta (para comunicarlo en documentación técnica) mediante un procedimiento estandarizado, en el coeficiente de absorción práctico de absorción α_p para cada octava de frecuencia (ver Fig.4). α_p es un indicador de lo bien que un material absorbe sonido, y se expresa en porcentaje (o tanto por uno). Los valores oscilan por lo tanto (teóricamente) entre 0 (material totalmente reflectante) y 1 (material totalmente absorbente). Por ejemplo, un α_p de 0.75 significa que el 75% de la energía sonora que impacta contra dicho material es absorbida y no devuelta (reflejada) de nuevo a la estancia.

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

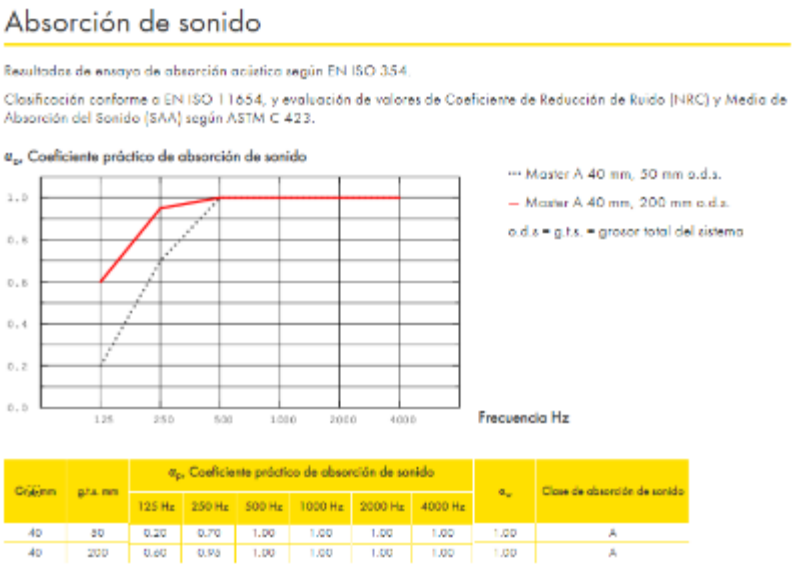


Fig.4. Ejemplo de los resultados de absorción obtenidos para el producto Ecophon Master A según la ISO-354 (donde se explica el método de medida) e ISO-11654 (donde se especifica cómo medir y evaluar los resultados).

Obtención del coeficiente de absorción ponderado α_w

Como se puede ver en la Fig.4, el coeficiente de absorción práctico α_p tiene diferentes valores para cada frecuencia (para cada octava de frecuencia). Esto puede a veces dificultar la comunicación entre profesionales, especialmente si no se tiene un conocimiento básico de acústica, a la vez que no resulta práctico. Por lo tanto, lo que propone la norma ISO 11654 [4] es un método para la obtención de un coeficiente de absorción ponderado α_w que, de algún modo, resume el rendimiento global del material en términos de absorción acústica. Mediante un procedimiento de comparación de los datos α_p obtenidos del test (como los de la Fig.4) con una curva de referencia (definida en la norma ISO 11654), se obtiene un único número ponderado α_w. Además, la norma también establece una clasificación en la que se establecen las clases de absorción acústica de los materiales basado tanto en el α_p como en el α_w (Fig.5). Junto a la clase de absorción del material, se debe especificar siempre también la distancia del plenum/cámara (distancia del forjado al falso techo). Cuanta más absorción hay en un local, mejor será el acondicionamiento acústico.

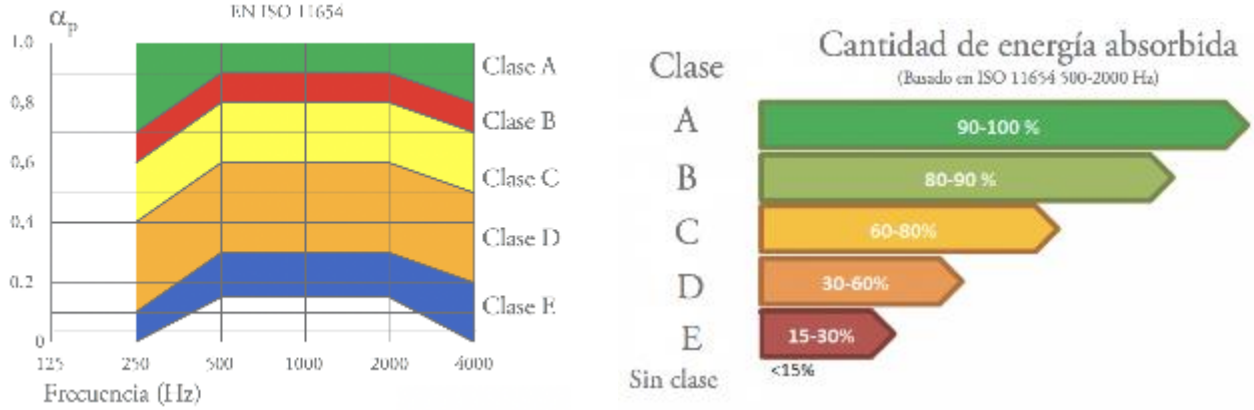


Fig.5. Clases de absorción establecidas en ISO 11654 basado en el coeficiente de absorción para cada frecuencia α_p (izquierda) y el ponderado α_w (derecha; representado de modo similar a la eficiencia energética), donde Clase A representa la absorción más alta.

A modo de ejemplo, una lana mineral suele ser (dependiendo del descuelgue, etc.) una solución fonoabsorbente clase A, mientras que una viruta de madera, un techo perforado (dependiendo del velo acústico superior) o un wetfelt, suele ser clase C-D (aproximadamente un 30% menos de efectividad). Un material "acústicamente duro" (como el hormigón o la escayola) se sitúan por debajo de la Clase E.

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

De un modo gráfico (Fig.6), se podría ilustrar la influencia del coeficiente de absorción ponderado de la siguiente forma. Imaginémonos que tenemos una superficie de 10 m^2, la cual recubrimos con un falso techo absorbente. Si este material absorbente es Clase C (p.ej. α_w=0.7), podríamos decir (simplificando) que solamente un 70% (7 m^2) del material estaría absorbiendo "activamente" ruido, mientras que el 30% restante se estaría reflejando. Sin embargo, si el α_w fuese 0.95 (es decir, material Clase A), casi todo el material (excepto un 5%; es decir 9.5 m^2) estaría absorbiendo ruido; con lo que aprovecharíamos de una forma más efectiva la superficie física disponible para acondicionar mejor. α_w representa una especie de rendimiento de absorción de un material.

Fig.6. Representación gráfica del significado del α_w. Cuanto mayor sea el α_w más "rendimiento de absorción" y por lo tanto mejor aprovecharemos la superficie física cubierta con un material acústico (reduciendo así la reverberación en la sala).

α_w y NRC/SAA – Diferencia

Según lo expuesto anteriormente, el resultado del test acorde a las normas ISO 354 y ASTM C 423 es una curva que expresa el coeficiente de absorción α_p (en tanto por uno) en función de la frecuencia, como la expuesta en Fig.4. Aunque la norma americana y la internacional podrían en algún caso arrojar resultados virtualmente idénticos de α_p, los descriptores α_w y NRC pueden ser bastante diferentes… ¿por qué?

NRC (de sus siglas inglesas *Noise Reduction Coefficient* – coeficiente de reducción de ruido), al igual que α_w, es un indicador medio que indica un porcentaje de energía absorbida por un material. Aunque son similares, ninguno de los descriptores puede ser directamente deducido a partir del otro, ya que no hay una relación matemática entre ellos. Esto es debido a la forma de obtener estos indicadores. Mientras que α_w usa un método de comparación del coeficiente de absorción práctico α_p con una curva de referencia (dando diferente importancia a diferentes frecuencias, ya que el oído humano no reacciona igual a todas las frecuencias), NRC hace una simple media aritmética (dando igual peso a todas las frecuencias) de los valores de α_P obtenidos en el test. Se considera que α_w representa mejor cómo el oído humano percibe el sonido.

Además, el NRC ignora frecuencias por debajo de 250 Hz y superiores a 2 kHz (es decir, el número NRC es un indicador que es obtenido de la media aritmética de 4 frecuencias de octava: 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz). Debido a lo anterior, a efectos prácticos en NRC es útil para comparar rendimientos acústicos en términos de absorción en el rango de las frecuencias de la voz humana (para música, estudios de grabación, teatros…) pero obvia las bajas y altas frecuencias.

NRC es a veces substituido por el valor SAA (de sus siglas en inglés *Sound Absorption Average* – media de absorción del sonido), que viene definido en el estándar americano ASTM C423 09a. La diferencia entre NRC y SAA es que el valor de SAA es la media de los coeficientes de absorción prácticos α_p de los tercios de octava (12 en total) que van de 200 a 2500 Hz (es decir, incluye más valores en la media, pero sigue sin dar pesos diferentes a frecuencias bajas y altas).

¿Por qué a veces veo en catálogos valores de absorción mayores a 100%?

Hay veces que se ve en hojas de producto coeficientes de absorción de un material mayores a 1. ¿Cómo puede ser que el material absorba más cantidad de energía de la que realmente le llega? Aunque teóricamente es imposible, este fenómeno tiene que ver con cómo están diseñados los ensayos.

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

Las dimensiones que se usan en la fórmula a la hora de calcular la absorción tiene en cuenta solo dos dimensiones (largo y ancho). Pero realmente, el material que se está testando tiene también un espesor, que aumenta el área que realmente está expuesta al sonido. Esto se conoce en inglés como el *edge effect* (efecto borde). Para solucionar esto, las normas recomiendan colocar una superficie de material lo suficientemente grande para que el espesor sea "despreciable" en comparación con las otras dimensiones. Otra solución que se adopta en determinados casos es colocar placas de metal alrededor de los bordes para hacerlos más reflectantes y disminuir su influencia en el cálculo del coeficiente de absorción. Otra razón de este fenómeno es que se está subestimando la energía incidente, ya que en las medidas se tiene más que la que hay teniendo en cuenta las hipótesis de la ley de Sabine (que asume una onda plana impactando en una superficie), ver Fig. 7. Es decir, la distribución no uniforme de intensidad sonora nos puede modificar los resultados en frecuencias altas, mientras que a bajas frecuencias lo que más nos influye es el tamaño de los productos.

No obstante, los valores mayores a 1 solo se permiten cuando se presenta el valor de absorción α_s (es decir, el valor extraído directamente de las medidas de laboratorio en octavas). Ese valor suele convertirse , a la hora de presentar hojas de características de soluciones acústicas, en el coeficiente de absorción práctico α_P, cuyo valor está limitado superiormente a 1, según el estándar ISO 11654 (ver Fig.8).

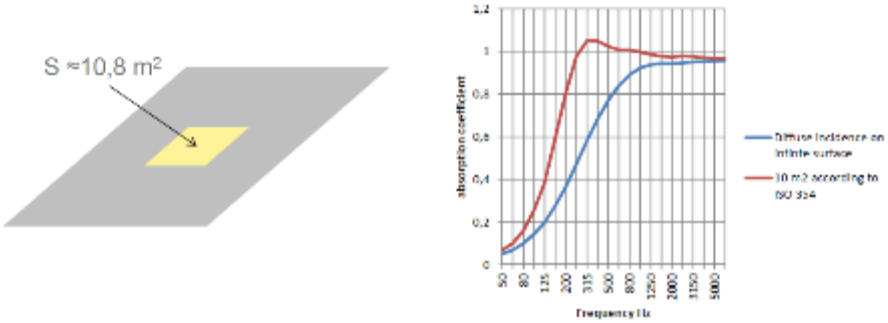
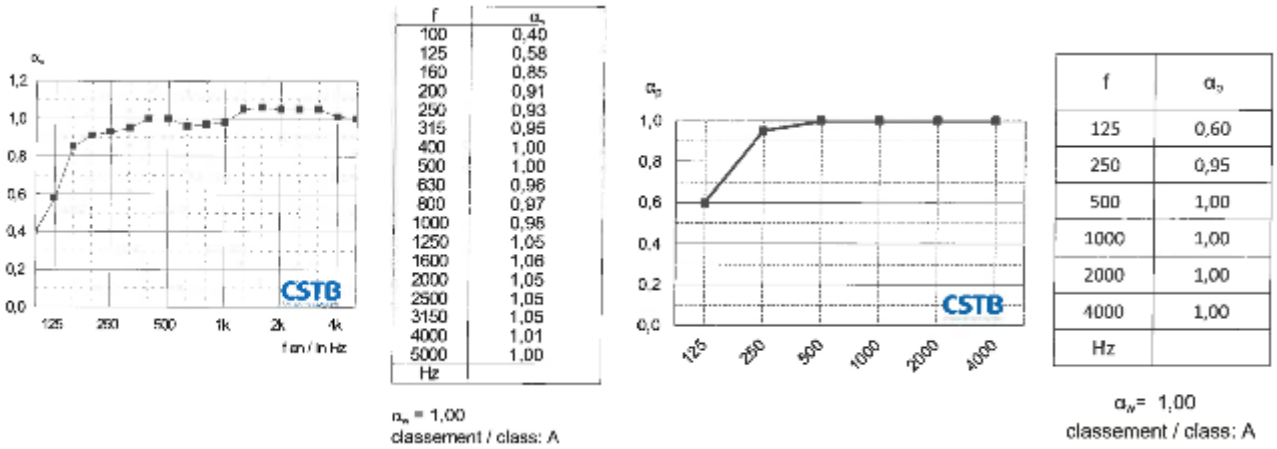


Fig. 7. Comparación del coeficiente de absorción de una placa de 10 m² medido según la ISO 354 (color rojo) y el cálculo del mismo sobre una superficie infinita sujeta a un campo difuso (color azul).



f	α_s
100	0,40
125	0,58
160	0,85
200	0,91
250	0,93
315	0,95
400	1,00
500	1,00
630	0,96
800	0,97
1000	0,96
1250	1,05
1600	1,06
2000	1,05
2500	1,05
3150	1,05
4000	1,01
5000	1,00
Hz	

f	α_p
125	0,60
250	0,95
500	1,00
1000	1,00
2000	1,00
4000	1,00
Hz	

Fig. 8. Medidas de absorción, según la ISO 354, de la solución Ecophon Master A (con plenum de 200 mm). A la izquierda, se presentan los resultados en tercios de octava (más resolución) en función de α_s, y a la derecha, los mismos resultados "ajustados" (es decir, α_P).

Unidades suspendidas (*Free hanging units* –FHU) – Otra forma de medir la absorción

En el caso de bafles e islas, el hecho de medir el coeficiente de absorción práctico α_p puede ser complicado. Si el absorbente es pequeño o no tiene una superficie bien definida que esté expuesta al sonido, no es relevante ni posible calcular el coeficiente de absorción (Fig.9). En estos casos, podemos cuantificar la absorción de un material según su área de absorción equivalente A_{eq}, en vez del coeficiente de absorción práctico α_p. Esta es una propiedad muy útil e importante de la ecuación de Sabine, lo que significa que incluso para objetos "no planos" como muebles, personas, etc., la eficiencia absorbente se puede cuantificar por el área de absorción

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

equivalente A_{eq} expresada en m² por objeto. El procedimiento para medir también está definido en la norma ISO 354. No existe un área de absorción acústica equivalente "ponderada" como en el caso de los paneles y techos, por lo que la mejor manera de comparar un techo absorbente con una isla o bafle es calcular el tiempo de reverberación para cada habitación y situación.

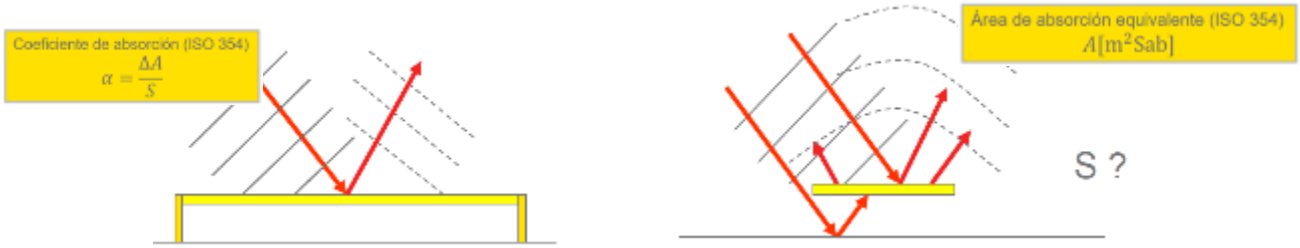


Fig.9. Panel de techo absorbente medido según ISO 354 (izquierda) y situación equivalente con una isla (derecha). En el caso de la isla, es más difícil estimar el área expuesta, por lo que la absorción se da en términos de área de absorción equivalente por pieza.

En la Fig.10, se puede ver el procedimiento para obtener el área de absorción equivalente para islas o bafles. Según lo expuesto anteriormente, la norma estipula el área mínima de absorbente que hay que considerar durante las medidas, por lo que normalmente lo que hay que hacer es introducir más de una FHU para realizar las medidas. Al igual que en caso de techos absorbentes, se obtiene una diferencia en área de absorción midiendo la diferencia en tiempo de reverberación con la cámara reverberante llena y vacía, según:

$$\Delta A = A_{\text{ConMaterial}} - A_{\text{SinMaterial}} = \left(\frac{0.16 \cdot V}{T_{20,\text{ConMaterial}}} - \frac{0.16 \cdot V}{T_{20,\text{SinMaterial}}}\right)$$

Posteriormente, se divide esa diferencia en área de absorción entre el número de unidades (FHU) que se consideró durante el test, obteniendo así el área de absorción en m² por objeto. En la Fig.10, sería, por ejemplo:

$$A_{FHU} = \frac{\Delta A}{6}$$

A la hora de medir A_{FHU} (área de absorción equivalente de una unidad), la norma EN 16487:2015 [5], que nos habla de la disposición de los ensayos, nos estipula que ha de haber 2 metros entre cada objeto a la hora de medir, ya que, si se colocasen más juntos, no funcionarían como objetos individuales sino como un conjunto (falso techo acústico).

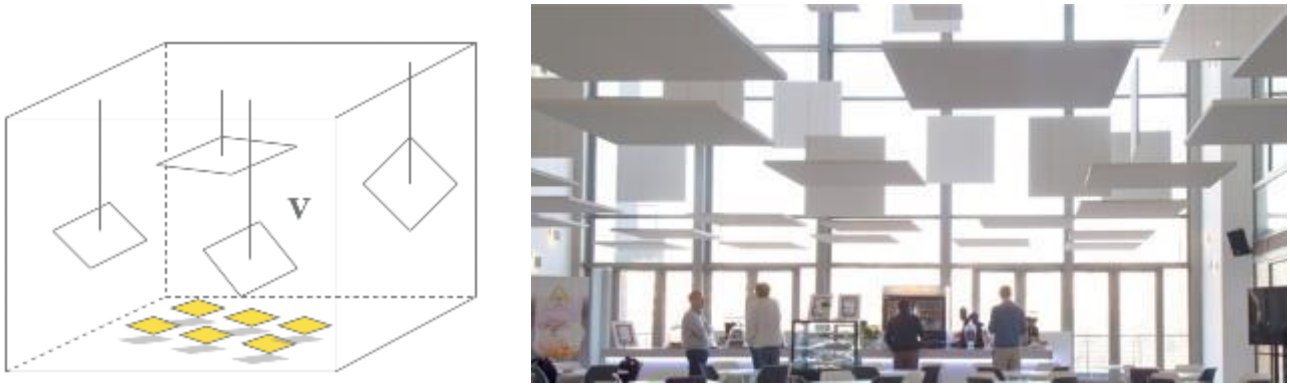


Fig.10. Esquema de la cámara reverberante con los difusores colgando y las "free hanging units" -en amarillo- que se va a medir (izquierda), así como una foto de unas islas acústicas "Ecophon Solo" (derecha).

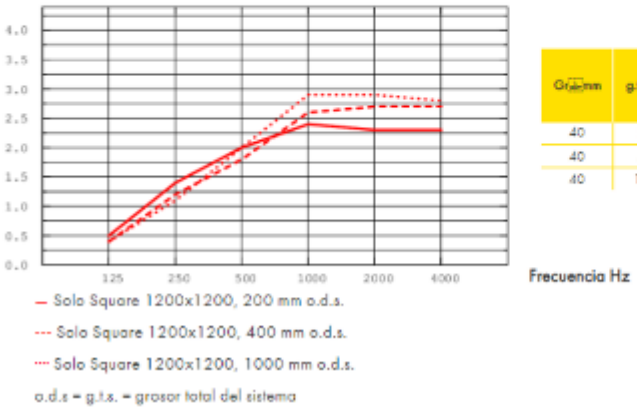
juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

Absorción de sonido

Los valores en el diagrama hacen referencia a las medidas de una única pieza independiente. Si las unidades se colocan en un grupo con las unidades separadas menos de 0,5 metros, la Aeq por unidad se reducirá ligeramente.

Resultados de ensayo según norma EN ISO 354.

A_{eq}, Área de absorción equivalente por unidad (m2 sabin)



Gr/m²/mm	g.t.s. mm	A_{eq}, Área de absorción equivalente por unidad (m2 sabin)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
40	200	0.5	1.4	2.0	2.4	2.3	2.3
40	400	0.4	1.2	1.8	2.6	2.7	2.7
40	1000	0.4	1.1	2.0	2.9	2.9	2.8

Fig.11. Ejemplo de los resultados de absorción obtenidos para un producto -Ecophon Solo Square- según la ISO-354.

Bafles absorbentes

Al igual que en el caso de techos continuos y unidades suspendidas, al medir la absorción acústica de bafles, se usaría también el método de la cámara reverberante descrito en la norma ISO 354:2004, la disposición descrita en la EN 16487:2015 [5], y la clasificación en clases presentada en la ISO 11654:1997 [4]. La absorción de bafles se puede expresar tanto en términos del coeficiente de absorción α (si hay grandes áreas acondicionadas con ellos, que se pueden tratar como un falso techo) o como del área de absorción equivalente por objeto (si se están separados uno de otro). Las formas de medir en cada caso serán diferentes.

Por eso, es muy importante comparar siempre resultados de absorción de elementos medidos con la misma configuración. Según la nueva norma EN 16487:2015 [5], por ejemplo, se exige (para la obtención del coeficiente de absorción) colocar un marco alrededor de los bafles que estarán separados una cc600. En caso de medir siguiendo la norma antigua (que no requería que los bafles estuviesen bordeados por un marco), los datos de absorción serían más favorables (ver Fig. 13).

Fig.13. Ejemplo de disposición de bafles en el laboratorio para medir su coeficiente de absorción. Con marco siguiendo la EN 16487:2015 (izquierda) y sin marco (derecha). La configuración sin marco dará valores de absorción ligeramente mayores.

juan.negreira@saint-gobain.com
@JNegreira_dB
Juan Negreira

Tabla 1. Principales diferencias entre las normas ISO 354 y la ASTM C423

Comparativa norma ASTM & ISO		
Parámetro	ASTM C423	ISO 354
Volumen cámara reverberante recomendado [m³]	200 Mínimo 125 / Máximo no estipulado	200 Mínimo 150 / Máximo 500
Área de placa recomendada [m²]	Mínimo 5.57 (60 pies²) / Máximo no especificado	10-12 Si V_{sala}>200 m³ → aumento de $(V/200)^{2/3}$
Distancia de cámara [mm]	400	200 (Europa)
Rango de frecuencias medidas [Hz]	100-5000	100-5000
Posiciones de micrófono, fuente y muestra	≥5 (fijos) / ≥1.5m entre mic. / ≥0.75m a la muestra	≥3 (fijos) / ≥1.5m entre mic. / ≥2m de la fuente / ≥1m a superficies reflectantes y muestra
Retraso y rango de ensayo	100-300 ms y caída de 25 dB	5 dB y caída de 20 dB
Descriptor ponderado	SAA: media 200-2500 Hz (12 tercios octava) NRC: media 250-2000 Hz (4 octavas)	α_w: media (ponderada) 250 4000 Hz

Referencias

[1] ISO 3382:2009. Acústica – Medición de parámetros acústicos en recintos (partes 1, 2 y 3),
[2] ISO 354:2004: Acústica – Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
[3] ASTM C423: Sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method.
[4] ISO 11654:1997: Acústica – Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica.
[5] UNE EN 16487:2015: Acústica – Código de ensayo para techos suspendidos. Absorción acústica