

## ESTUDIOS DE LA DIFUSIVIDAD DE UN CAMPO ACÚSTICO

PACS: 43.58.Bh

Susana Torregrosa<sup>1</sup>; Sergi Soler<sup>2</sup>; Ivana Rosell<sup>3</sup> y Higiní Arau<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Enginyeria i Arquitectura La Salle

Pg. Bonanova 8,

08022 Barcelona, Spain

E-mail: <sup>1</sup> si06093@salle.url.edu; <sup>2</sup> ssoler@salle.url.edu; <sup>3</sup> ivana@salle.url.edu;

<sup>4</sup> Estudi Acústic H. Arau

Travessera de dalt 118, 3er 1a,

08034 Barcelona, Spain

E-mail: h.arau@arauacustica.com

### ABSTRACT

The initial premise of many statistical theories is the supposition that the acoustic field is completely diffuse, and it's only fulfilled in certain situations. In the measurement of reverberation a non-diffuse acoustic field causes non-constant slope curves that make it difficult to measure the TR value correctly.

This paper is the beginning of a larger study about how can we evaluate and quantify the diffusivity of an acoustic field, as well as its effects on the measurement of TR and the repercussion in the different statistical theories we usually work with.

### RESUMEN

Uno de los requisitos iniciales de la teoría estadística es la suposición de que el campo acústico bajo estudio es completamente difuso. Pero estas condiciones de total difusividad de campo sonoro se dan en muy pocas ocasiones, sucediendo a menudo que las previsiones teóricas difieren, en mayor o menor grado, de los valores reales medidos.

Esta inexactitud de la formulación estadística en campos no difusos afecta también a la medida del coeficiente de absorción en cámara reverberante, que es el punto de partida de toda simulación acústica.

En este trabajo nos proponemos estudiar el comportamiento de los campos acústicos no difusos y sus repercusiones en la medida del coeficiente de absorción utilizado en las teorías estadísticas.

### 1.- INTRODUCCIÓN

Las teorías estadísticas de predicción de la reverberación son una de las herramientas más rápidas y sencillas que tenemos para la simulación acústica de espacios arquitectónicos. Se trata de modelos matemáticos simples que plantean la extinción del sonido en un recinto desde un punto de vista estadístico suponiendo que se cumplen una serie de premisas.

La más destacable de estas premisas es la suposición de que el campo sonoro sea completamente difuso, cosa que sucede en pocas ocasiones, pero que en muchos casos se acepta a modo de aproximación.

Esta aproximación ocasionará errores en los resultados de las simulaciones, pero hay un tema aún más preocupante: la obtención de los coeficientes de absorción utilizados en estas teorías. Estos coeficientes normalmente se miden en cámara reverberante y siguiendo la norma ISO 354. Esta norma utiliza la teoría estadística de Sabine pero realiza la medida en un campo no difuso, por lo que los coeficientes obtenidos ya pueden estar afectados por el problema que planteamos.

## **2.- EFECTOS DE LA FALTA DE DIFUSIVIDAD SOBRE LA MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN CÁMARA REVERBERANTE**

### 2.1.- Descripción:

La primera fase de este trabajo es el estudio de los efectos que la no difusividad de campo sonoro provoca sobre los resultados de la medida del coeficiente de absorción en cámara reverberante.

Es posible determinar el coeficiente de absorción de un material en cámara reverberante a partir del tiempo de reverberación de la sala vacía y del tiempo de reverberación de la sala una vez se ha introducido la muestra de ensayo. Con estos dos valores se puede calcular la absorción de la muestra, y con ella el coeficiente de absorción.

Pero el resultado obtenido a partir de la medida del coeficiente de absorción en cámara reverberante no siempre resulta tan exacto como se desearía ya que, en determinadas circunstancias, el propio método de medida puede resultar inadecuado.

Estos errores se manifiestan especialmente al medir el coeficiente de absorción de materiales altamente absorbentes. En estas circunstancias el campo sonoro dentro de la sala reverberante, una vez se ha colocado la muestra de ensayo, deja de poder considerarse difuso, por lo que pasa a incumplirse el campo de validez de la propia formulación utilizada. Sólo la existencia en las mediciones de la aparición del EDT es un síntoma claro del incumplimiento del estado difuso en una sala.

Por un lado, que el valor del coeficiente de absorción que se obtiene como resultado de la medida pueda llegar a ser superior a la unidad, incumpliendo la propia definición energética de este coeficiente, es una incongruencia física que debiera poderse remediar. También, se observa que los resultados obtenidos varían en función de una serie de variables que en principio no deberían intervenir en el resultado, pero que en cambio introducen variaciones significativas, tales como la forma de la sala, la colocación de la muestra de ensayo en la sala o el propio tamaño de la muestra. Para determinar en qué modo estas variables afectan al resultado del coeficiente de absorción se han realizado gran cantidad de mediciones.

Finalmente cabe remarcar que, aunque la normativa establece el uso de la teoría de Sabine, existe la posibilidad de utilizar más de una formulación a la hora de obtener el coeficiente de absorción a partir de los valores de tiempo de reverberación, hemos querido calcular, para cada una de las medidas efectuadas, tanto el coeficiente de absorción de Eyring como el de Sabine.

Las medidas realizadas, junto con los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas se exponen a continuación.

### 2.2.- Medidas efectuadas:

A continuación se detallan las medidas que se han realizado con el objetivo de comprobar de qué modo intervienen variables como el tamaño y la ubicación de la muestra de ensayo en el resultado de la medida del coeficiente de absorción. En todos los casos hemos medido el

coeficiente de absorción de una lana de roca de 120 Kg/m<sup>3</sup> y 5 cm de espesor. Las medidas se han realizado siempre en la misma sala.

La sala en cuestión es la cámara reverberante de la Facultad de Ingeniería de La Salle Universidad Ramon Llull. Tiene un volumen de 212 m<sup>3</sup> y es un poliedro irregular de seis caras (formalmente serían once, ya que el techo está formado por seis caras), donde ninguna de ellas son paralelas entre sí. Tanto las caras laterales como el techo están cubiertas con azulejos. El suelo es de mármol.

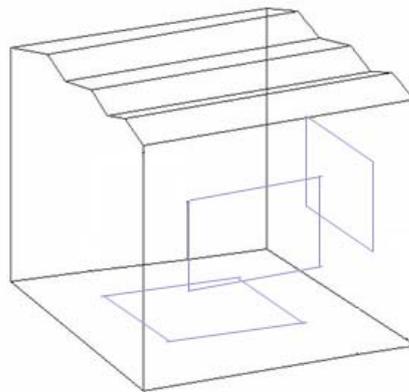
Todas las medidas de coeficiente de absorción se han realizado cumpliendo con la norma ISO 354, respetando los criterios que en ella se establecen tanto en cuanto a distancias entre micrófono, fuente, paredes, bordes de muestra, etc., como en cuanto a las características técnicas de los equipos utilizados.

Para determinar la importancia de la ubicación de la muestra en la sala hemos realizado tres bloques de medidas diferentes. En el primer bloque de medidas la muestra de ensayo está colocada en el suelo, en el segundo bloque está en una de las paredes y en el tercer bloque de medidas la muestra de ensayo se reparte entre tres superficies (suelo y dos paredes perpendiculares entre sí), de manera que existe material absorbente en cada una de las tres dimensiones espaciales.

A la vez, cada uno de los bloques anteriores está compuesto por diversas medidas diferentes, cada una realizada a partir de distintos tamaños de muestra de ensayo. De esta manera obtenemos el coeficiente de absorción para diferentes tamaños de muestra de ensayo.

Recordemos que para cada uno de los casos anteriores hemos calculado tanto el coeficiente de absorción de Sabine como el de Eyring.

En la figura 1 puede verse un croquis de la sala. En él no se muestran las puertas de entrada, pero sí la posición de la muestra de ensayo en las tres dimensiones.



*Fig. 1. Sala reverberante con la posición de las 3 muestras perpendiculares.*

### 2.3.- Resultados:

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos a partir de medir el coeficiente de absorción con la muestra de ensayo colocada en el suelo, para Sabine y Eyring respectivamente. En cada uno de los gráficos puede verse el resultado obtenido a partir de diferentes tamaños de muestra de ensayo.

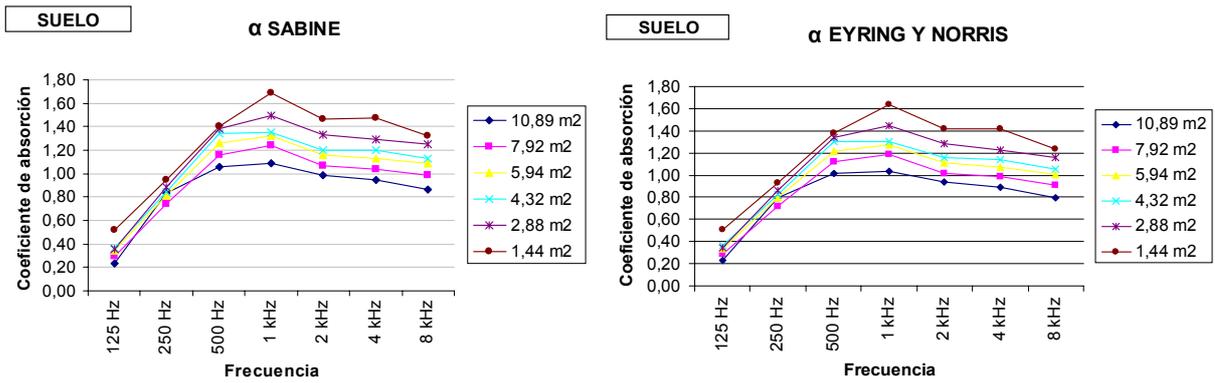


Fig. 2. Resultados con la muestra ubicada en el suelo

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos a partir de medir el coeficiente de absorción con la muestra de ensayo colocada en una pared, también para Sabine y Eyring respectivamente. Igualmente, en cada uno de los gráficos puede verse el resultado obtenido a partir de diferentes tamaños de muestra de ensayo.

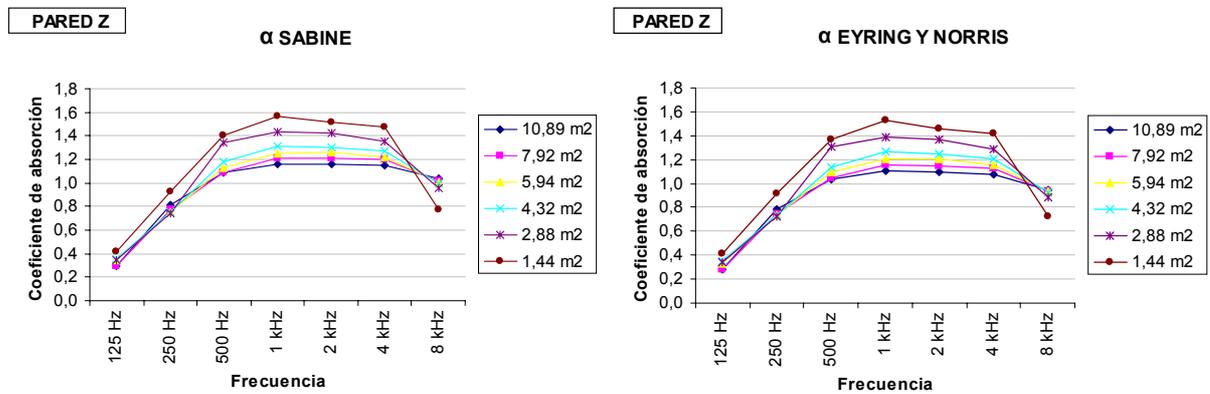


Fig. 3. Resultados con la muestra ubicada en una pared lateral.

Finalmente, en la figura 4 se muestran los resultados obtenidos a partir de medir el coeficiente de absorción con la muestra de ensayo colocada en las tres dimensiones mutuamente perpendiculares (dos paredes y suelo), también para Sabine y para Eyring respectivamente. En cada uno de los gráficos también puede verse el resultado obtenido a partir de diferentes tamaños de muestra de ensayo.

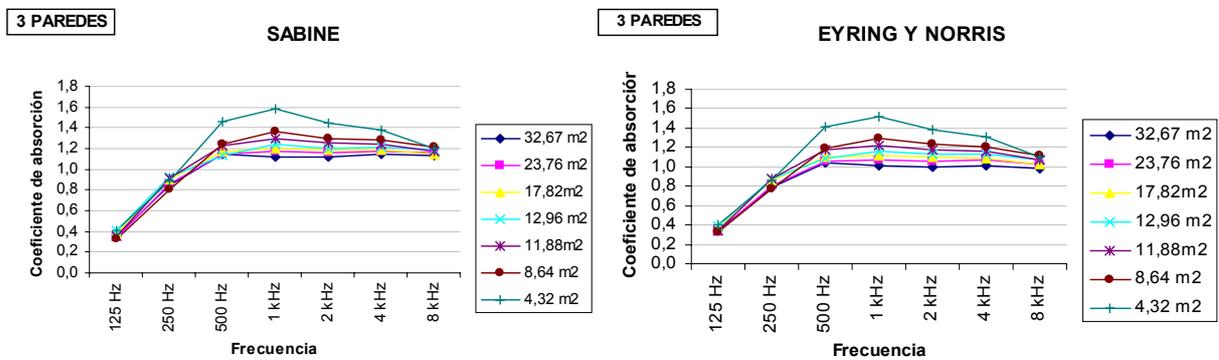


Fig. 4. Resultados con la muestra distribuida entre las tres posiciones (2 paredes y suelo)

#### 2.4.- Comentarios sobre los resultados:

Vemos que el coeficiente de absorción de Sabine, determinado experimentalmente, siempre resulta mayor que el obtenido a partir de la expresión de Eyring. Esto puede demostrarse matemáticamente, si se efectúa el desarrollo en series de potencia de la expresión de Eyring y aproximamos al segundo orden, podemos obtener el valor del coeficiente de absorción de Eyring en función del coeficiente de absorción de Sabine a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha_E = \alpha_S \cdot \left( 1 - \frac{S_m}{2 \cdot S} \cdot \alpha_S - \frac{A_0}{S} \right)$$

Donde  $S_m$  es la superficie de la muestra de ensayo,  $S$  es la superficie de la cámara reverberante y  $A_0$  es la absorción acústica equivalente de la cámara reverberante.

Puede comprobarse por lo tanto que el coeficiente de absorción de Eyring siempre dará un valor menor al de Sabine.

En caso de que se cumplan las condiciones:

$$\alpha_S \cdot S_m \ll 2 \cdot S \quad \text{y} \quad A_0 \ll S$$

los dos coeficientes deberían tener valores muy similares. De hecho, este es el argumento que posiblemente dio pie a que la norma ISO 354 utilice el coeficiente de absorción Sabine frente al de Eyring.

Pero, pese a que en nuestro caso se cumplen estas dos condiciones, evaluando los resultados a los que hemos llegado creemos que la diferencia entre los coeficientes de absorción entre Eyring y Sabine son significativos, cuando el coeficiente de absorción del material es alto, por lo que creemos que no se debe despreciar esta corrección, siendo más correcto elegir Eyring frente a Sabine.

Lo primero que se puede apreciar al observar los resultados, tanto a los correspondientes al coeficiente de absorción de Sabine como a los determinados aplicando Eyring, es que en la gran mayoría de los casos se obtienen valores superiores a la unidad, excepto para el caso de Eyring de mayor área de la disposición tridimensional de la muestra

La superación de alfa >1 nunca debería suceder, ya que significa estamos contradiciendo la propia definición física del balance energético del coeficiente de absorción.

Otro dato que se manifiesta al observar los resultados, y que además resulta de gran importancia, es la constatación de que a medida que disminuye la superficie de la muestra de ensayo aumenta el valor del coeficiente de absorción obtenido. Este hecho, que evidentemente contradice la teoría estadística, ya fue observado por Meyer [4] en las investigaciones que realizó en 1937.

Estos resultados pueden explicarse debido a que el sonido en la sala no se esté repartiendo en todas las direcciones por igual, sino que existan direcciones privilegiadas. Las ondas que inciden en la muestra de ensayo desaparecen rápidamente, mientras que las que viajan paralelas al plano en el que se encuentra la muestra prácticamente no se ven afectadas por ella, provocando una reverberación remanente, en las otras dos direcciones de la sala, que con toda probabilidad han de influir en el resultado del coeficiente de absorción.

Para influir sobre los rayos paralelos a la muestra de ensayo Meyer y Schoch [5] propusieron en 1939 que la muestra de ensayo se reparta en tres paredes mutuamente perpendiculares entre sí. Nosotros hemos efectuado este tipo de mediciones en el tercer bloque de medidas pero, tal y como puede verse en la figura 4, estas variaciones del alfa con el área de la muestra siguen produciéndose, tanto con uso de Sabine o Eyring, pero como hemos comentado antes, sólo Eyring no superó la unidad para el caso de mayor área de muestra repartida en tres

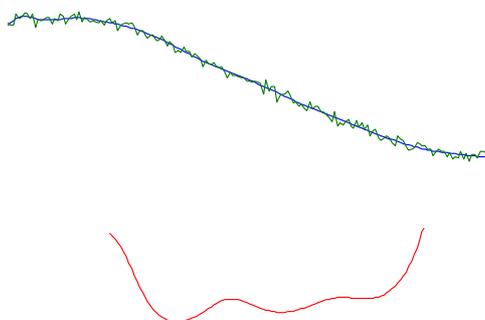
direcciones. Y esto es un síntoma muy importante de que el campo sonoro está consiguiendo un reparto más homogéneo.

### 3.- ESTUDIO DE LA LINEALIDAD DE LAS CURVAS DE CAIDA DE TR

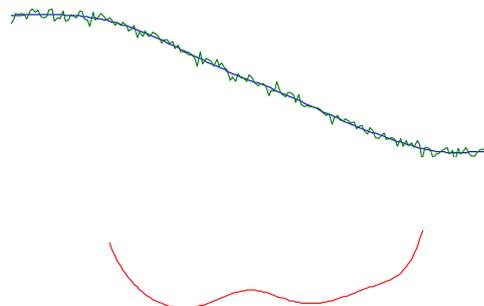
Actualmente estamos analizando la forma de las curvas de caída de TR en función de la difusividad del campo acústico. Seguimos haciendo medidas en la sala reverberante ubicando paneles absorbentes en las diferentes superficies.

La evaluación de las pendientes no es tarea fácil a simple vista, lo que nos ha llevado a estudiar la primera derivada de las curvas de caída, que tiene una relación directa con el TR de las mismas. Los gráficos obtenidos se pueden interpretar como la evolución de los "TR instantáneos" en cada instante del tiempo, y entendemos que en un campo idealmente difuso deberían ser constantes durante toda la caída (rectas horizontales).

A modo de ejemplo, en las figuras 5 y 6 mostramos dos medidas realizadas en la misma configuración (absorbente en tres caras no paralelas de la sala) pero en dos posiciones espaciales diferentes, ambas correspondientes a la banda de tercio de octava centrada a 1KHz. El TR medido según ISO 354 es el mismo, pero las pendientes de las caídas evolucionan de forma diferente.



- Fig. 5: Posición centrada en la sala -



- Fig. 6: Posición cercana a una pared -

El suavizado de las caídas se ha realizado por mínimos cuadráticos y la derivada se ha calculado a partir de la curva suavizada.

Los primeros resultados dejan ver que por tónica general las caídas presentan dos o tres pendientes consecutivas diferentes. Dichas pendientes pueden no percibirse a simple vista pero su medida a partir de la derivada de las caídas presenta una buena repetitividad. Los cambios de posición de la fuente, del micrófono o de los paneles absorbentes en la sala ocasionan variaciones importantes en estas pendientes, lo que nos hace pensar que en su estudio reside la clave para evaluar lo difuso que es el campo acústico en cada punto del espacio.

### 4.- CONCLUSIONES

ISO 354 es un método para normalizar la obtención de un coeficiente de absorción universal, pero trabaja con un campo acústico no difuso aún y basarse en la teoría estadística.

Este hecho puede provocar errores en los coeficientes obtenidos y es de esperar que estos errores sean mayores cuanto menos difuso sea el campo sonoro durante la medida.

La difusividad del campo sonoro depende de factores tales como la forma de la sala, la distribución de la absorción en la misma y posiblemente del grado de absorción de la muestra de ensayo, cuestión última que no ha sido posible experimentar con materiales de menor coeficiente de absorción acústica. Ubicando muestras de material en las tres dimensiones mutuamente perpendiculares del recinto hemos experimentando una clara dependencia del coeficiente de absorción con el tamaño de la muestra analizada, aunque hemos comprobado que con el caso de mayor área, utilizando la fórmula de Eyring, no se supera el alfa unitaria.

La evaluación de la reverberación puede ser otra causa de error. La no difusividad del campo rompe la linealidad de las curvas de caída obtenidas, haciéndonos cuestionar qué pendiente se debe utilizar para la obtención del TR60.

La clave parece residir en determinar una relación entre la forma de las curvas de caída y las características energéticas, espaciales y temporales del campo acústico.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W.S. Franklin. "Derivation of equation of decaying sound in a room and definition of open window equivalent of absorbing". Physical Review Vol. XVI 1903
- [2] Eyring, C.F., "Reverberation time in "dead rooms"". J.A.S.A., 1 (1930) pg. 217.
- [3] Eyring, C.F., "Methods of calculating the average coefficient of sound absorption". J.A.S.A., 4 (1933) pg. 178.
- [4] Meyer, E., Akust. Zh., 2 (1937) 179.
- [5] Meyer, E. y Schoch, A., Akust. Zh., 4 (1939) 61.
- [6] Arau – Puchades, H. (1999). ABC de la Acústica arquitectónica. Ed. Ceac, S.A.
- [7] Cremer, L., Principles and Applications of Room Acoustics Vol. II