



## REVERBERATION TIME IN ROOMS WITH NON-DIFFUSE SOUND FIELD

PACS: 43.55.Br

Rossell, Ivana.<sup>1</sup>; Artís, Pere<sup>2</sup>

<sup>1 2</sup> Enginyeria i Arquitectura La Salle; Quatre Camins 2, 08022 Barcelona, Spain; [ivana@salle.url.edu](mailto:ivana@salle.url.edu); [pereag@salle.url.edu](mailto:pereag@salle.url.edu)

### ABSTRACT

Sabine and Eyring equations are based on a diffuse field theory. Most cases in real rooms present a non-diffuse sound field. This paper addresses an analytical comparison of classical equations to “non-diffuse field” equations, such as Fitzroy’s, Arau’s or the European Standard EN 12354 part 6 from Nilsson’s theory. The influence of the room shape and the absorption distribution in the room are considered. Also scattering effect is taken into account in some cases in this study. According to these considerations, Arau’s and Nilsson’s model accuracy seems to supersede one to the other depending on the room shape and absorption distribution.

### REVERBERATION THEORIES REVIEW

La ecuación de Sabine y en general las ecuaciones clásicas, conducen a subestimar el tiempo de reverberación en algunas situaciones de campo no difuso (situaciones dadas con bastante frecuencia en la realidad). Un factor que puede romper esta difusión es la distribución heterogénea de la absorción pues muchas veces el tratamiento acústico se realiza únicamente en una superficie del recinto, siendo el techo el que por comodidad suele tratarse mayoritariamente. Este hecho provoca un campo no uniforme conllevando a errores significativos en la predicción del TR60 basado en las ecuaciones citadas.

Las teorías llamadas direccionales (Fitzroy [1], Arau [2], Neubauer [3]) intentan resolver esta situación ponderando la absorción según la dirección y superficie donde es asignada.

La ecuación de Eyring no se ha tenido en cuenta puesto que en los casos estudiados sabemos que el tiempo real es superior al estimado por Sabine y éste es siempre superior al de Eyring, así pues Eyring no tiene ningún interés en este estudio. Neubauer tampoco será importante en la valoración, dado que en las situaciones analizadas no aportaba casi diferencias respecto Sabine.

A continuación recordamos las expresiones de Sabine, Fitzroy y Arau:

$$T_{Sabine} = \frac{60 \cdot V}{1,086 \cdot c \cdot S \cdot \alpha_m} \quad (1)$$

$$T_{Fitzroy} = \left( \frac{S_x}{s} \right) \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right] + \left( \frac{S_y}{s} \right) \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right] + \left( \frac{S_z}{s} \right) \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right] \quad (2)$$

$$T_{Arau} = \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right]^{\frac{S_x}{s}} \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right]^{\frac{S_y}{s}} \left[ \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{\frac{S_z}{s}} \quad (3)$$

donde:

$S_x$  = área del techo + área del suelo.

$S_y$  = área de las paredes laterales.

$S_z$  = área de paredes frontal y posterior.

$S_T$  = área total de las paredes.

$\alpha_x$  es el valor medio (aritmética ponderada) de los coeficientes de absorción de cada superficie del área  $S_x$ .

Uno de los últimos estudios sobre distribución irregular de absorción en salas rectangulares fue presentado por Nilsson (1992, ref [4]), que consideró espacios de baja altura con tratamiento absorbente en el techo. La idea de su teoría se basa en la consideración de los modos rasantes y no rasantes respecto las superficies absorbentes (caracterizadas por su impedancia acústica). También tiene en cuenta los efectos de "scattering" debido a objetos o superficies difusoras, acoplando los dos tipos de modos. Esta teoría da tiempos de reverberación superiores a Sabine aunque necesita ajustes para adaptarse a la realidad. Gerretsen (2006, ref [5]), aplicó unas simplificaciones al modelo de Nilsson permitiendo un uso más cómodo y con buenos resultados teóricos.

Nilsson calculaba el número de modos rasantes a cada par de superficies (siempre considerando salas rectangulares) y el número de modos no rasantes. De esta forma, obtenía unas relaciones entre modos rasantes y no rasantes ( $N_x=N_{gx}/N_{ng}$ ) para cada dirección:

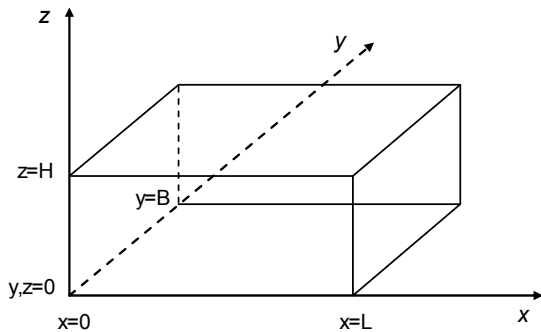


Figure 1.-Nomenclatura para salas rectangulares

$$N_x = 0.14 + 1.43 \left( \frac{B+H}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} BH \right) \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V} \quad (4)$$

$$N_y = 0.14 + 1.43 \left( \frac{L+H}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} LH \right) \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V} \quad (5)$$

$$N_z = 0.14 + 1.43 \left( \frac{L+B}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} LB \right) \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V} \quad (6)$$

Estas ecuaciones siguen la nomenclatura expresada en la figura 1, que se adoptará a lo largo del artículo para caracterizar los recintos estudiados.

El modelo de Nilsson ha acabado adaptándose para el Standard UNE-EN-ISO 12354-6 (ref [6]). No expondremos aquí estas ecuaciones a causa de su extensión, pero comentaremos algunos puntos importantes. Este modelo calcula dos tiempos de reverberación usando unos resultados para la baja frecuencia y otros para la alta frecuencia (teniendo en cuenta, a estas frecuencias, el efecto de absorción de la difusión de las superficies y obstáculos). El límite entre bajas y altas frecuencias se halla en función del volumen del recinto y, por tanto, está influenciado por la densidad de modos.

## ESTUDIO TEÓRICO COMPARATIVO

A continuación mostramos algunos casos estudiados analíticamente según diferentes ecuaciones. Las características de las salas a estudio, así como los coeficientes de absorción y difusión según las situaciones, se recogen en la tabla 1 y 2.

Table I.- Room characteristics

Salas estudiadas	Longitud (L)	Ancho (B)	Altura (H)	Volumen (V)
Cubica (CU)	7	7	7	49
Normal (NR)	9	7	6	378
Larga (L)	13	7	4	364
Muy larga (VL)	20	6	3	360
Alta (H)	10	5	7,5	375
Muy alta (VH)	7	5	11	385

Table II.- Absorption treatment characteristics

	Absorption treatment
Caso 1	Sala sin tratar, todas las superficies con coeficiente igual y muy bajo
Caso 2	Caso 1 pero con techo muy absorbente
Case 3	Caso 1 pero con techo muy absorbente y suelo algo absorbente
Case 4	Tratamiento en techo y suelo como caso 3 y con paredes laterales tratadas a baja frecuencia
	Difusión
Difusión 1	Todas la superficies con alta difusión (desde 0,05 hasta 0,6 a altas frecuencias)
Difusión 3	Todas las superficies con difusión 0,05

**Resultados**

A continuación mostramos las gráficas con los resultados exponiendo algunos casos de cada tipología. El primer grupo de gráficas (Figure 2,3,y 4) se refieren al tratamiento acústico “Caso 2” para cada tipo de sala:

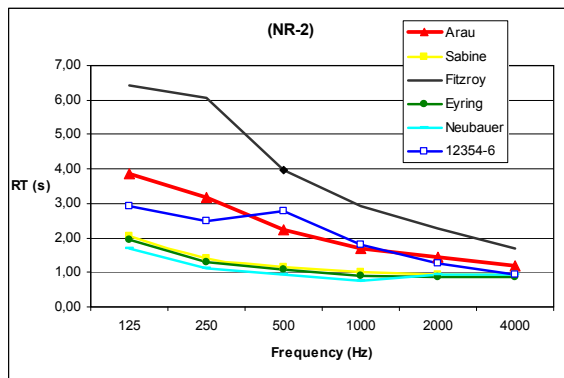
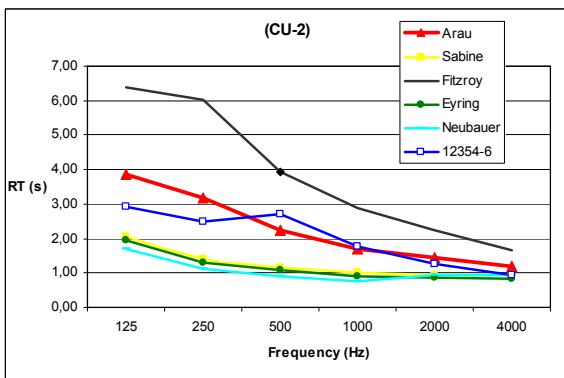


Figure 2.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling.

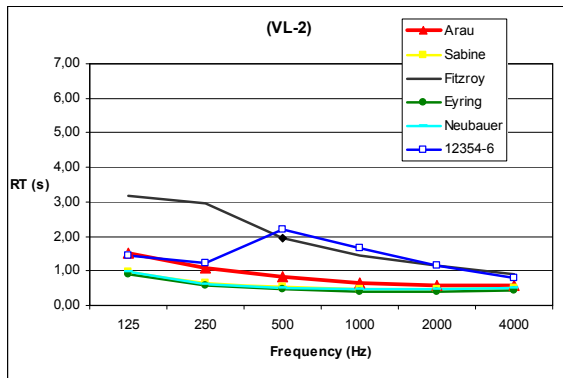
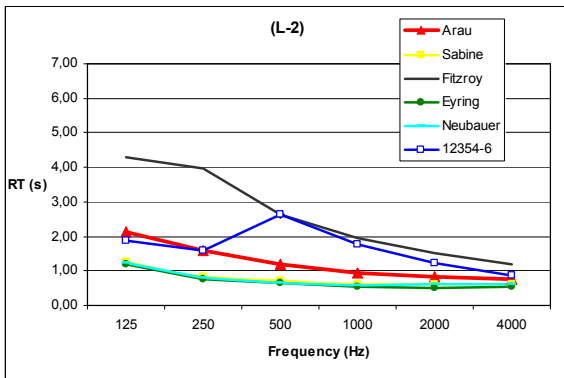


Figure 2.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling.

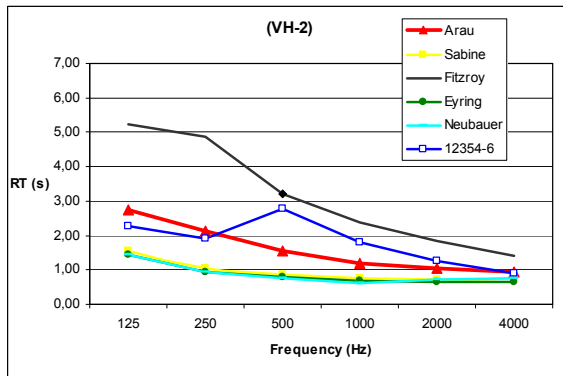
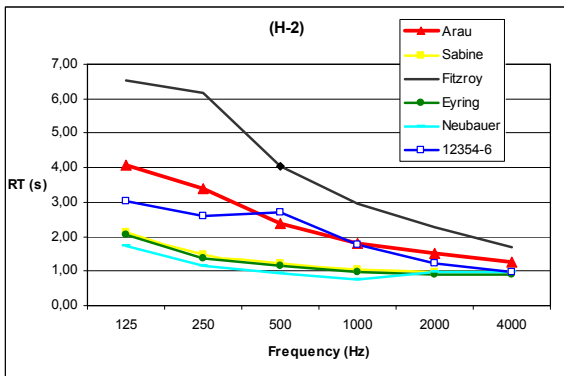


Figure 2.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling.

*Template for ISRA 2007 (Reverberation time with non-uniform absorption)*

Arau y Nilsson convergen bastante para el caso de salas cúbicas o casi cúbicas (con proporciones equilibradas). Arau apunta a un RT más elevado a bajas frecuencias y Nilsson muestra su subida característica a la frecuencia de corte de su modelo, 500 Hz para las salas estudiadas. Este último efecto se repetirá en muchos de los casos posteriores. Quizás la corrección que plantea para bajas frecuencias el modelo de Nilsson debería aplicarse a partir de una banda de octava superior a la indicada.

Para el caso de salas largas y muy largas (podríamos llamarlas planas, a estas últimas), el estándar se aleja de Arau, sobretodo a medias y altas frecuencias acercándose a Fitzroy, llegando a desviarse de Sabine más del 200%, en algunos casos. Para salas altas, Arau y Nilsson vuelven a converger bastante aunque Nilsson vuelve a alejarse mucho en la banda de 500 Hz.

En la figura 5, donde se estudia el tiempo de reverberación de las salas sin tratamiento acústico alguno, vemos la coincidencia de resultados de todas las teorías excepto el modelo estándar, desviándose nuevamente a los 500 Hz. En las gráficas hemos presentado los casos de sala cúbica y sala muy larga.

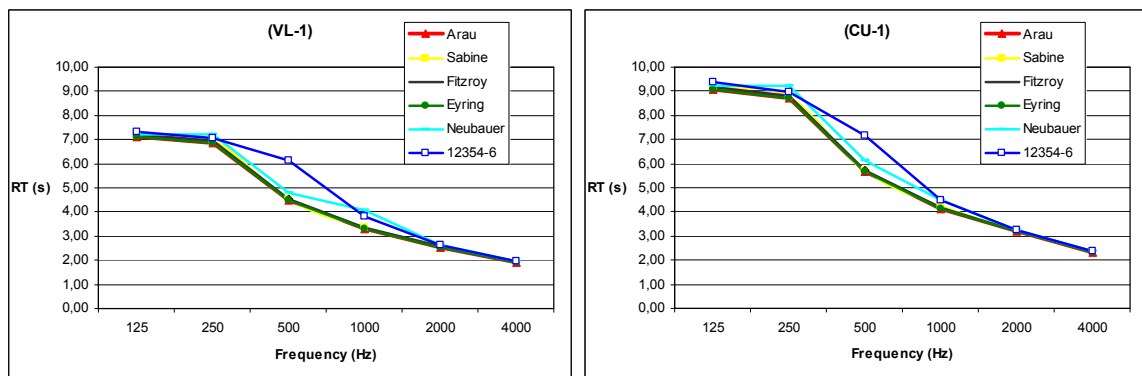


Figure 5.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling.

Para el caso 4 de tratamiento acústico (Figure 6), añadiendo absorción al suelo y paredes laterales, las ecuaciones de Arau y EN 12354-6 apuntan a valores de reverberación muy parecidos. En estos casos sólo se aprecia una ligera desviación a frecuencias altas. Esto implica que para absorciones más elevadas, las fórmulas convergen, mientras que en casos anteriores, donde el coeficiente de absorción medio a baja frecuencia era bajo, las ecuaciones divergen más.

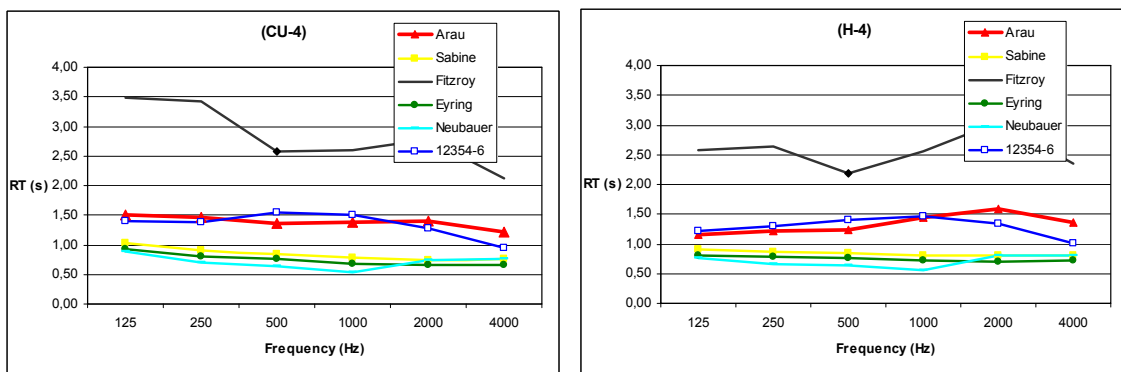


Figure 6.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling.

Después de algunas comprobaciones más, se añadió un coeficiente de difusión a todas las superficies de las salas. Se probaron varias situaciones, se comprobó como a partir de valores de scattering medianamente elevados (desde 0,2 hasta 0,6) los diferentes resultados con scattering difieren poco. En cambio, para valores de scattering bajos, de 0,05, los resultados son interesantes, pues difieren del caso de scattering cero y del caso con cierto scattering. A continuación vemos lo que ocurre en las Figura 7, en línea discontinua:

*Template for ISRA 2007 (Reverberation time with non-uniform absorption)*

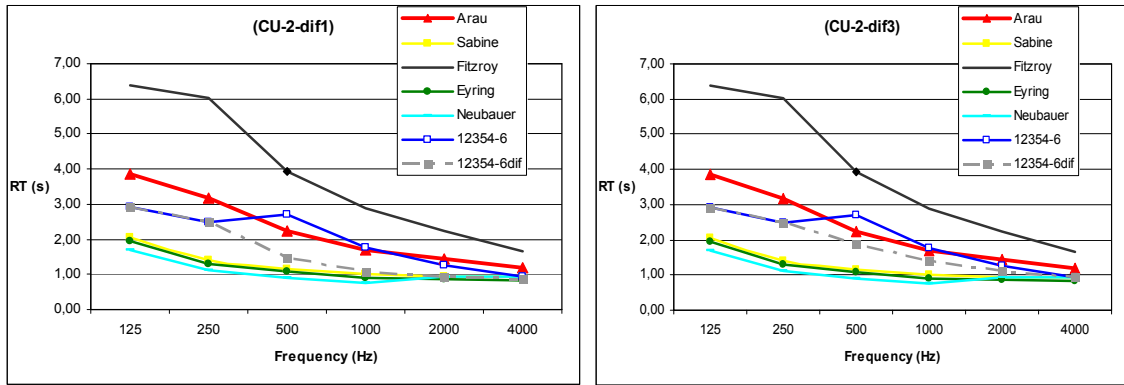


Figure 7.-Cubic and Normal room with an absorption ceiling. La línea discontinua representa el resultado con scattering. Para el caso "dif1", el coeficiente de scattering tomaba valores altos a medias y altas frecuencias. Para el caso "dif3" a la derecha, el coeficiente de scattering era muy bajo (0,05 a todas las frecuencias), aunque, por lo que se aprecia, suficiente para provocar desviaciones importantes con respecto al modelo sin scattering.

Las situaciones expuestas muestran como en el caso de difusión 1, el scattering exagerado a medias y altas frecuencias, crea un descenso de RT que acerca los resultados a la curva a Sabine. Para el caso de difusión 3, tomando un valor de scattering de 0,05 a todas las frecuencias vemos como la curva disminuye quedando por debajo de los valores de Arau.

**Relative Deviation**

Hemos creído interesante mostrar las diferencias entre Arau, Fitzroy y la EN-12354-6 con respecto a Sabine, pues Sabine sigue siendo la ecuación más usada en tratamientos acústicos cotidianos, como aulas, restaurantes, oficinas, etc.

Como se observa en los gráficos (see Figure 8), Fitzroy se escapa exageradamente del valor de Sabine (llegando a valores superiores al 300% de diferencia), Arau y EN-12354-6 convergen bastante excepto para el caso de salas largas, situación fácil de encontrar en la realidad.

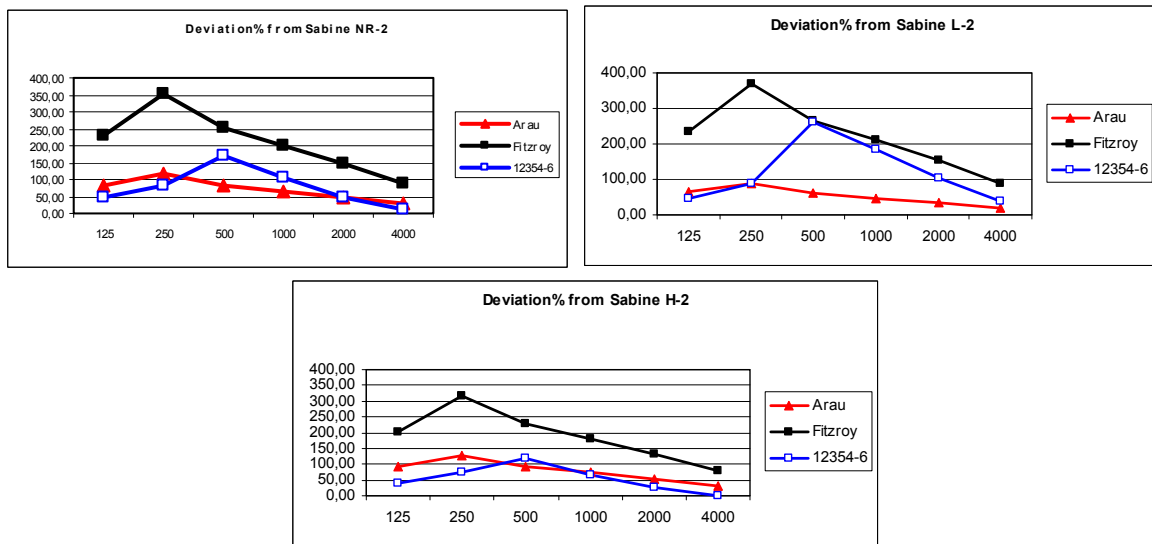


Figure 8.-Relative deviation % from Sabine

**CONCLUSIONS**

De los resultados vistos en la comparativa, parece ser que Arau y 12354-6 dan valores parecidos en muchos casos, sobretodo para salas cúbicas y altas. Para el caso de salas alargadas existe una discrepancia significativa entre las dos ecuaciones, por lo tanto, será una situación de "riesgo", según la teoría escogida para la predicción. La ecuación de Fitzroy se desvía demasiado en todos los casos analizados. También hemos comprobado que cuanto más absorbente sea la sala, menos desviación entre ambos modelos.

Parece ser que el modelo de Nilsson requiere un mínimo valor de scattering para proporcionar resultados más creíbles, pues los valores que proporciona con coeficiente de difusión cero son desproporcionados en algunos casos. También parece un poco exagerado el cambio que se aprecia en la curva tonal al pasar del valor para bajas frecuencias al valor estimado para altas frecuencias. En la banda de transición se dispara exageradamente el tiempo de reverberación.

Sigue siendo un problema el efecto de las concertaciones de modos propios a baja frecuencia para el caso de salas pequeñas, pues sabemos que pueden provocar elevados tiempos de reverberación aunque ninguna ecuación lo refleje.

Todas estas situaciones deberían corroborarse en casos reales, realizando medidas, aunque es difícil conseguir una situación real que se adapte totalmente al planteamiento teórico. Gerretsen compara sus resultados con ray tracing program results, no vemos del todo seguro que un software sea la referencia verdadera, pero en cualquier caso, debemos ser conscientes de las discrepancias de cada ecuación según Sabine puesto que es la más usada y la exigida en muchas normativas y leyes de la edificación.

### **Acknowledgement**

Thanks to Higiní Arau por su colaboración en este proyecto.

### **References**

1. D. Fitzroy, Reverberation formula wich seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption. *Journal of the Acoustical Society of America* **31** (1959) 163–180.
2. H. Arau, An improved reverberation formula. *Acustica* **65**, (1988) 163-180.
3. Neubauer, Reinhard O. Prediction of reverberation time in rectangular rooms with non uniformly distributed absorption using a new formula. Tecniacústica Madrid, 2000.
4. Gerretsen, Eddy, Estimations Methods for sound levels and reverberation time in a room with irregular shape or absorption distribution. *Acta Acustica* 92 (2006) 797-806
5. E. Nilsson, Decay processes in rooms with non-diffuse sound fields. Report TVBA-1004, Lund Institute of Technology, Department of Engineering Acoustics, 1992.
6. UNE-EN ISO 12354-6: Building Acoustics- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements- Part 6: sound absorption in enclosed saces. 2003.