

## Influencia de la difusión en la simulación acústica de un recinto.

PACS 43.55.Ka

Martí, Josep & Rossell, Ivana  
Campus La Salle  
Universitat RAMON LLULL  
San Joan de La Salle, 42. 08022 Barcelona

### Abstract

An evaluation of diffusion in the prediction of the room acoustic characteristics: reverberation time (T30 and EDT), coverage (SPL), definition (D50), musical clarity (C80), intelligibility (STI) and lateral energy (LF). A study of the effects of the specular and diffused propagation of rays on particular enclosures, by means of the CATT-Acoustic program. The effects of diffraction are also considered through edge diffusion and its influence on the estimation of these parameters.

### Resumen

Valoración de la difusión en la predicción de las características acústicas de una sala tales como el tiempo de reverberación (T30 y EDT), la cobertura de niveles (SPL), la definición (D50), la claridad musical (C80), la inteligibilidad de la palabra (STI) y la energía lateral (LF). Mediante el programa CATT-Acoustic se estudian los efectos de la propagación de rayos de forma especular y de forma difusa sobre recintos concretos. Se consideran también los efectos de la difracción a través de la difusión de borde y su influencia en la valoración de estos parámetros.

### 1. Objetivo de nuestro trabajo

Desde la aparición de nuevos ordenadores utilizados como potentes instrumentos de cálculo, la posibilidad de simulaciones virtuales de la acústica de salas ha ido aumentando progresivamente hacia soluciones más fiables que aproximan cada vez mejor las soluciones virtuales a la realidad acústica verificable de los diferentes espacios cerrados o abiertos.

Seguramente que el primer introductor de estos métodos fue ya M. R. Schroeder [1] y sus colaboradores hacia el año 1962. Con todo, el primer introductor de la simulación digital de los recintos musicales fue A. Krokstad [2] en el año 1968, con la evaluación de diferentes parámetros acústicos a partir de la respuesta impulsional obtenida por el método de trazado de rayos (Kuttruff, H. pg. 300) [3].

Aun siendo bien conscientes de los márgenes de inseguridad que presentan los programas para la simulación y previsión de la acústica en los recintos, estos no dejan de ser herramientas potentes para el diseño acústico de grandes espacios, mientras podamos partir de datos de absorción, difusión y difracción suficientemente fiables. (Vorländer 2013) [6].

El estudio geométrico de la acústica de un recinto se puede realizar por el método de las fuentes virtuales o por el método del trazado de rayos. En nuestro caso nos centraremos más en el segundo procedimiento, según el cual se considera un impulso inicial formado por un número elevado de rayos emergentes a partir de una determinada fuente en todas las direcciones posibles. Cada uno de los rayos es considerado en su trayectoria a través de sucesivas reflexiones en las paredes o en los obstáculos del recinto hasta un tiempo

determinado. Se considera también la respuesta al impulso inicial observada en un punto o un conjunto de puntos receptores del mismo recinto. De hecho, más que puntos receptores lo que hay que considerar son unas superficies relativamente pequeñas en torno a los puntos considerados.

La reflexión en las paredes del recinto se realiza de forma no exclusivamente especular, de tal manera que una parte de la energía reflejada se dispersa de forma más o menos aleatoria según las características acústicas del material de cada superficie. En este trabajo pretendemos estudiar los efectos de esta dispersión ("scattering") en los diferentes parámetros que definen la acústica de una sala.

## 2. Reflexión especular i reflexión difusa

De la energía incidente sobre una superficie, una parte es absorbida o transmitida al otro lado de la superficie. El resto es la energía reflejada que retorna al recinto emisor. De ésta una parte se refleja de forma especular ( $E_{spec}$ ) según la ley de Snell con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia. Esta parte de la energía reflejada es tanto más importante cuanto más lisa es la superficie. El resto de la energía se difunde de forma más o menos aleatoria en todas las direcciones. Se define un coeficiente de dispersión  $s$  ("scattering") que corresponde a la relación entre la energía dispersa (no especular) y la energía total reflejada  $E_{refl}$ .

$$s = \frac{E_{refl} - E_{spec}}{E_{refl}} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{refl}}$$

La magnitud de este coeficiente está en relación con el tamaño de las rugosidades de la pared respecto a la longitud de onda, de forma que las grandes rugosidades son las que contribuyen para la dispersión de la baja frecuencia. Normalmente el coeficiente de dispersión aumenta con la frecuencia. De todas formas, siempre es necesario considerar un mínimo de difusión (10%) para todas las frecuencias, incluso las más bajas.

La difusión no especular responde a criterios no totalmente aleatorios. Uno de los criterios más utilizados responde a la ley de Lambert según la cual la intensidad acústica de los rayos dispersos es proporcional al coseno del ángulo que forma el rayo emergente con la normal a la superficie. Es decir que la máxima energía difusa se propaga en la dirección normal a la superficie y es nula en la dirección tangente a la misma (Kuttruff, H. pg. 110) [3].

La aplicación de este criterio de difusión se puede realizar de dos maneras: de forma estocástica o de forma determinista (B.-I. Dalenbäck) [5]. La difusión sigue un criterio estocástico si la energía difusa correspondiente a cada rayo incidente se refleja según un ángulo de difusión escogido aleatoriamente de acuerdo con el criterio de Lambert. La difusión se puede realizar también de forma determinista para cada reflexión repartiendo la energía difusa en un conjunto extenso de nuevos rayos distribuidos uniformemente en el espacio reflectante pero con una energía proporcional a la función de Lambert. Este segundo método supone un coste de cálculo mucho mayor que el primero pero da lugar a unos resultados más precisos. Por ejemplo: mediante la difusión determinista se detecta mejor la presencia de eco flotante entre dos paredes paralelas.

## 3. Dispersión de superficie i dispersión de borde

La dispersión de energía acústica es función del tamaño  $d$  de las irregularidades de la superficie comparado con la longitud de onda  $\lambda$ . Si la relación  $d/\lambda \ll 1$  la reflexión será fundamentalmente especular. Mientras que si  $d/\lambda \gg 1$  la reflexión será predominantemente difusa. Hoy por hoy, no se dispone de una valoración precisa del coeficiente de "scattering" para diferentes materiales, de manera que hay que recurrir a valores estimados a partir de esta relación  $d/\lambda$  que pueden oscilar entre 0,1 y 0,9. La consideración de este efecto es crucial para la correcta simulación de espacios acústicos.

Un efecto bien conocido de la propagación acústica es la difracción de los rayos incidentes en los límites de un obstáculo determinado, de forma que la energía acústica incidente sobre el borde de una superficie tiende a distribuirse también de forma aleatoria, aunque la superficie sea totalmente lisa. Este efecto denominado también dispersión de borde es particularmente importante cuando en un recinto se da la presencia de obstáculos tales como: planos

reflectores, paneles separadores, muebles, estanterías, etc. La energía difundida por este efecto depende también de la frecuencia, de manera que la difracción es más importante para bajas frecuencias que para altas frecuencias. Es decir que la difusión de borde en función de la frecuencia actúa al revés de la difusión de superficie.

#### 4. Efecto de la difusión sobre los diferentes parámetros acústicos

Veamos a continuación cual es el efecto de la dispersión o difusión acústica sobre los diferentes parámetros que caracterizan el comportamiento acústico de un recinto. Para este estudio hemos escogido un recinto real con bastantes irregularidades y obstáculos que faciliten la difusión y la difracción de los rayos acústicos. Concretamente se trata de un comedor universitario de 576 m<sup>3</sup>, con una capacidad de 150 plazas, del cual hemos podido medir y simular los parámetros acústicos más importantes sin la presencia de comensales (Fig. 1). El espacio tiene varias columnas, muebles i paneles. Las mesas y sillas se han simulado mediante planos de audiencia con unos coeficientes de difusión elevados.

La medición experimental ha consistido en la medida precisa del tiempo de reverberación del recinto por bandas de octava en 8 puntos diferentes. Los resultados son muy uniformes y corresponden a los que se especifican en valor medio (Tabla 1).

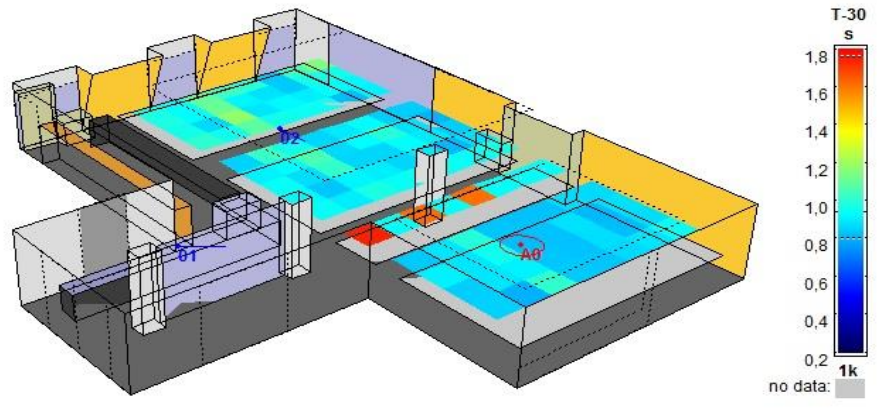


Fig. 1. Imagen del comedor donde se realizaron las medidas y simulaciones

TR 60 (s)	Promedio	Desviación
125 Hz	0,57	0,17
250 Hz	0,64	0,07
500 Hz	0,82	0,06
1 KHz	0,86	0,06
2 KHz	0,92	0,04
4 KHz	0,84	0,04
<b>Valor medio:</b>	<b>0,77</b>	<b>0,07</b>

Tabla 1. Tiempos de reverberación medidos en el comedor con su desviación estándar

La simulación acústica se ha realizado con el programa CATT-Acoustic con una fuente omnidireccional y con los resultados obtenidos sobre la superficie destinada a ser ocupada por el público a intervalos de 1 m<sup>2</sup>. En total 112 intervalos de los cuales se ha obtenido el valor medio de cada uno de los parámetros. Dado el carácter estocástico del proceso de difusión, los resultados pueden ser ligeramente distintos en cada una de las pruebas. Por ello, para cada parámetro se ha repetido el proceso en cinco simulaciones distintas i se ha considerado el valor medio de todas ellas. Los coeficientes de difusión del plano de audiencia considerado son los siguientes:

Frecuencias:	125	250	500	1000	2000	4000 (Hz)
Coeficientes de difusión:	40	50	60	70	80	80 (%)

Se ha considerado dispersión de borde en todos los muebles, las estanterías, los paneles, la barra del bar, las columnas y el plano de audiencia.

Por otra parte, se ha realizado el mismo proceso de simulación pero suponiendo reflexiones totalmente especulares, sin ningún efecto de difusión. En este caso los resultados son totalmente repetitivos, de forma que basta realizar una sola simulación.

#### 4.1 Efecto sobre el tiempo de reverberación (T30, EDT)

El efecto de dispersión de los rayos reflejados tiende a utilizar las diferentes superficies del recinto de forma más aleatoria de manera que la respuesta de la sala se acerca más a un modelo estadístico que normalmente prevé unos tiempos de reverberación más cortos (como en el caso de la previsión por Sabine o por Eyring) que los que corresponden a un modelo de propagación geométrica. Este efecto es de gran importancia, de manera que hoy en día todos los diferentes programas de simulación acústica por teoría de rayos tienen muy en cuenta este efecto de la difusión. En el caso de una reflexión exclusivamente especular los tiempos de reverberación obtenidos son notablemente más altos.

Nosotros hemos estudiado la diferencia entre un modelo puramente especular i un modelo con difusión en el caso del tiempo de reverberación (T30) del comedor anteriormente mencionado con todo su mobiliario. Las diferencias son muy altas (37,19 %) tal como se puede ver con los datos de la Tabla nº 2. Obsérvese como el incremento en porcentaje tiene un valor creciente con la frecuencia. Se da una excepción en la banda de 4 KHz, debido probablemente a una estimación insuficiente de la difusión a esta frecuencia.

T30 (s)	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) – (b)	%
125 Hz	0,83	0,62	0,21	25,06
250 Hz	1,17	0,76	0,41	34,70
500 Hz	1,24	0,82	0,42	34,11
1 KHz	1,6	0,92	0,68	42,50
2 KHz	1,72	0,95	0,77	44,83
4 KHz	1,35	0,78	0,57	41,93
<b>Promedio:</b>	<b>1,32</b>	<b>0,81</b>	<b>0,51</b>	<b>37,19</b>

*Tabla 2. Diferencia en el T30 según se considere o no el efecto de la difusión*

Si además consideramos el efecto de la dispersión de borde el resultado es ligeramente superior, tal como puede observarse en la tabla 3, de manera que la consideración de la dispersión de borde tiende a acortar aún más el tiempo de reverberación (un 40,69 %). Obsérvese la notable semejanza de estos valores con los obtenidos experimentalmente (Tabla 1), cosa que nos confirma la fiabilidad de los resultados obtenidos por el proceso de simulación.

D5	(a) Sin difusión	(b) Con difusión y difracción	Diferencia (a) – (b)	%
125 Hz	0,83	0,58	0,25	29,64
250 Hz	1,17	0,67	0,50	42,56
500 Hz	1,24	0,77	0,47	37,82
1 KHz	1,6	0,89	0,71	44,31
2 KHz	1,72	0,93	0,79	45,93
4 KHz	1,35	0,76	0,59	43,85
<b>Promedio:</b>	<b>1,32</b>	<b>0,77</b>	<b>0,55</b>	<b>40,69</b>

*Tabla 3. Diferencia en el T30 según se considere o no el efecto de difusión i difracción*

El mismo fenómeno se da en la estimación del EDT (Tabla 4) aunque el efecto de la difusión es inferior (23 %). En cualquier caso, observamos que la consideración de los efectos de difusión y difracción es totalmente indispensable en la simulación acústica de los espacios.

EDT (s)	(a) Sin Difusión	(b) Con Difusión	Diferencia (a) – (b)	%
125 Hz	0,53	0,48	0,05	9,4
250 Hz	0,71	0,56	0,15	21,1
500 Hz	0,79	0,61	0,18	22,8
1 KHz	1,06	0,76	0,30	28,3
2 KHz	1,16	0,80	0,36	31,0
4 KHz	0,9	0,67	0,23	25,5
<b>Promedio:</b>	<b>0,86</b>	<b>0,65</b>	<b>0,21</b>	<b>23,0</b>

*Tabla 4. Diferencia en el EDT según se considere o no el efecto de difusión*

#### 4.2 Efecto sobre los parámetros dependientes de la distribución temporal de la respuesta impulsional (D50, C80)

Los parámetros de definición de la palabra D50 y claridad musical C80 se miden a partir de la distribución temporal de la energía sobre la respuesta impulsional. Por tanto, es de esperar que cambien con los resultados correspondientes a los tiempos de reverberación. Mediante un proceso análogo al explicado anteriormente para la simulación del T30 hemos observado que el efecto de la difusión con la correspondiente disminución del tiempo de reverberación tiende a mejorar los resultados. En el caso de D50 (Tabla 5) este efecto es inapreciable ya que en nuestro recinto de referencia el mayor porcentaje de la energía acústica se concentra en los 50 primeros milisegundos de la respuesta impulsional, mientras que la energía restante resulta mucho menos importante. El efecto de la difusión sería mucho más notorio si estudiásemos un recinto con unos tiempos de reverberación más largos, como veremos posteriormente (Apartado 6). En las tablas que siguen obviamos el detalle de los datos correspondientes a cada banda frecuencial y damos directamente los valores medios obtenidos.

D50 (%)	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) – (b)	%
<b>Promedio:</b>	<b>71,27</b>	<b>71,74</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,7</b>

*Tabla 5. Diferencia en el D50 según se considere o no el efecto de difusión*

El parámetro de claridad musical C80 (Tabla 6) tiene una aplicación que no tendría interés en el caso de un comedor, pero lo hemos considerado también a efectos comparativos con el parámetro D50. En este caso se compara la energía en decibelios de los primeros 80 ms con el resto de la energía de la respuesta impulsional. Aquí la diferencia es más apreciable, de forma que la consideración de la difusión favorece la valoración de la claridad musical.

C80 (dB)	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) – (b)	%
<b>Promedio:</b>	<b>6,96</b>	<b>7,87</b>	<b>-0,91</b>	<b>-13,1</b>

*Tabla 6. Diferencia en el C80 según se considere o no el efecto de difusión*

#### 4.3 Efecto sobre la inteligibilidad de la palabra (STI)

La inteligibilidad de la palabra medida con el parámetro STI (Speech Transmission Index) resulta poco sensible al efecto de la difusión, con una ligera mejora del 6 % cuando se considera la difusión (Tabla 7). El hecho ya era de esperar ya que la inteligibilidad de la palabra siempre empeora con un aumento del tiempo de reverberación.

STI	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) – (b)	%
<b>Promedio:</b>	<b>0,670</b>	<b>0,696</b>	<b>-0,04</b>	<b>-6,0</b>

*Tabla 7. Diferencia en el STI según se considere o no el efecto de difusión*



#### 4.4 Efecto sobre la cobertura SPL

La cobertura sobre la zona de público resulta muy poco afectada por la consideración de la difusión (1,4 %). Si no se considera la difusión se produce un ligero incremento del tiempo de reverberación, lo cual explica este incremento de los niveles en el caso de reflexiones completamente especulares (Tabla 8).

SPL (dB)	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) - (b)	%
Promedio:	71,85	70,84	1,01	1,4

Tabla 8. Diferencia en los niveles SPL según se considere o no el efecto de difusión

#### 4.5 Efecto sobre la energía lateral LF

La energía reflejada por las paredes laterales es muy importante en salas de conciertos para favorecer la sensación de música envolvente. Se mide a partir de la energía de las primeras reflexiones laterales. Es de esperar que el efecto de la difusión sea menos importante para su cuantificación. En efecto, esto es así tal como puede verse por los datos obtenidos (Tabla 9).

LF:	(a) Sin difusión	(b) Con difusión	Diferencia (a) - (b)	%
Promedio:	23,21	23,63	-0,42	-1,8

Tabla 9. Diferencia en la energía lateral LF según se considere o no la difusión

### 5. Dispersión sobre la superficie de audiencia

La superficie de audiencia suele ser la zona que provoca máxima dispersión de los rayos debido a las grandes irregularidades de la misma. En los procesos de simulación se suele representar como una superficie uniforme con unos determinados coeficientes de absorción y de difusión bastante elevados y crecientes en función de la frecuencia. La consideración de la absorción lateral de la audiencia sugiere utilizar una especie de caja plana situada sobre el suelo con unas caras laterales correspondientes a la altura considerada de los asientos más las personas.

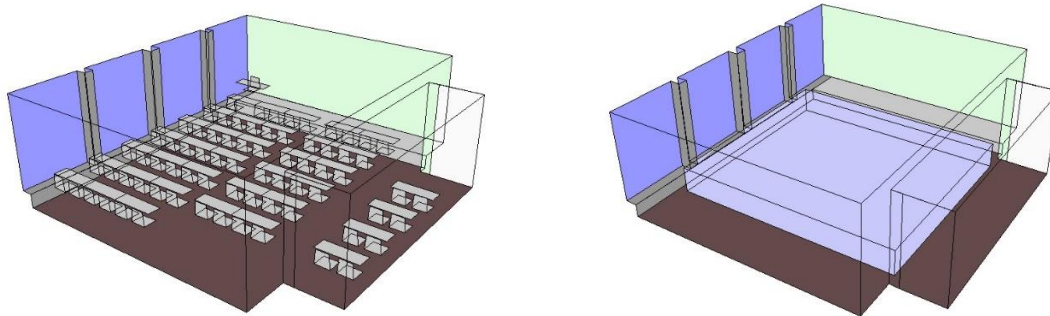
Cabría también la representación de la audiencia como objetos separados y yuxtapuestos con las sillas, las personas que las ocupan y, en su caso, también las mesas. En este caso la difusión quedaría forzada ya por la distribución de estos elementos diferenciados. Nosotros hemos estudiado por separado los dos sistemas de representación de la audiencia en una aula en ausencia de público y para las diferentes frecuencias, con los mismos coeficientes de absorción y difusión en los dos modelos (Fig. 2). Los resultados de los parámetros acústicos obtenidos en ambos casos difieren muy poco (Tabla 10).

	(a) Superficie única en forma de caja					(b) Elementos aislados				
	T30	EDT	D50	C80	D/R	T30	EDT	D50	C80	D/R
125 Hz	1,33	1,3	44,11	1,68	-14,23	1,41	1,4	42,51	1,33	-13,87
250 Hz	1,17	1,09	50,4	2,98	-13,16	1,22	1,17	48,65	2,57	-12,88
500 Hz	0,95	0,81	61,22	5,28	-11,21	1,01	0,86	58,91	4,84	-11,1
1 KHz	0,82	0,57	74,28	8,45	-8,58	0,85	0,61	71,65	7,88	-8,69
2 KHz	0,71	0,61	70,2	7,49	-9,57	0,8	0,65	68,23	7,04	-9,52
4 KHz	0,62	0,43	81,57	11,15	-7,05	0,62	0,46	79,66	10,55	-6,98
Promedio:	0,93	0,80	63,63	6,17	-10,63	0,99	0,86	61,60	5,70	-10,51
					(a) - (b):	-0,05	-0,06	2,03	0,47	-0,13
					% :	-5,2	-6,6	3,3	8,2	1,2

Tabla 10. Diferencias de parámetros según se considere la audiencia como una superficie única o como elementos aislados

Curiosamente el tiempo de reverberación del aula sale con valores ligeramente superiores (un 5,2 %) en el caso de considerar elementos diferenciados; cuando, a primera vista, parecería

que por este método cabría esperar un aumento de la difusión y en consecuencia una reducción de la reverberación. La multiplicación de pequeñas superficies reflectantes podría ser la causa del aumento del tiempo de reverberación. Los demás parámetros también varían en concordancia con este ligero aumento del T30. Todo ello nos confirma que la consideración de la audiencia como una caja uniforme es suficiente para la valoración de la acústica de un recinto destinado a la presencia de público, mientras se incluyan los valores correspondientes de “scattering” o dispersión de rayos.



**Fig. 2 Aula con sillas y mesas y aula con caja de audiencia**

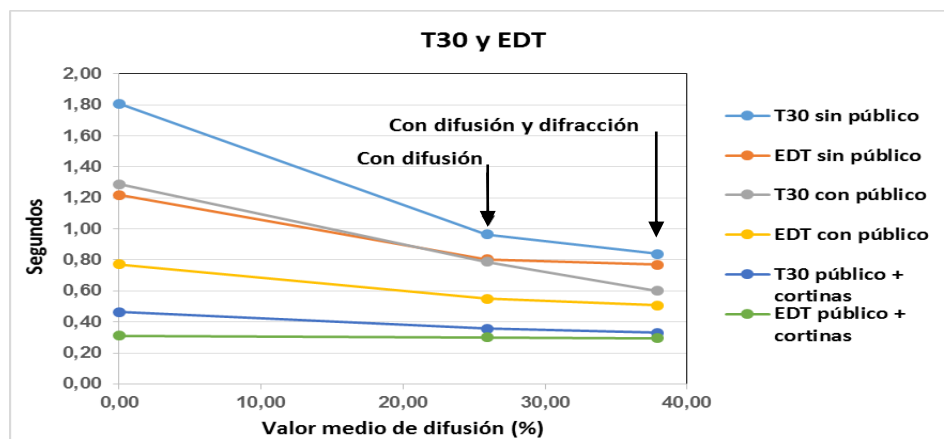
La consideración de los detalles del mobiliario no añade más precisión a los resultados de la simulación. Tal como indica Ingolf Bork (2005) [4], es preferible la consideración global de superficies difusoras con pocos planos y con los valores adecuados de los coeficientes de absorción y difusión.

## 6. Efecto de la absorción

Es interesante también constatar la influencia de la absorción global de un recinto para ver el efecto de la difusión en los diferentes parámetros acústicos del mismo. Para valorar este efecto hemos considerado el aula representada en la figura 2 en tres situaciones diferentes:

- La sala sin público, lo que corresponde a un coeficiente de absorción medio de  $\alpha = 0,15$ .
- La sala con público sentado en las sillas, lo que corresponde a un valor medio  $\alpha = 0,26$ .
- La sala con público y cortinas en tres de las paredes laterales, con  $\alpha = 0,36$ .

En cada uno de los tres casos hemos estudiado el efecto de considerar la difusión de superficie (En nuestro caso: valor medio de  $s = 25,9\%$ ) y añadiendo la difusión de borde (Valor medio de  $s = 37,9\%$ ), comparado con el resultado que se obtendría si no se considera la difusión ( $s = 0$ ). En el primer caso el efecto de la difusión es muy importante y afecta muy especialmente a la respuesta impulsional, acortando su longitud. Por tanto, los tiempos de reverberación se reducen notablemente. Estos efectos se visualizan en la figura 3, donde hemos considerado los valores medios de T30 i de EDT para todas las octavas comprendidas entre 125 Hz y 4 KHz.



**Fig. 3 Efecto de la difusión sobre T30 y EDT para diferentes valores de absorción**

Obsérvese como los efectos de la difusión son más apreciables en el caso de baja absorción y muy poco apreciables en el caso de alta absorción.

El mismo estudio se ha realizado con los parámetros de definición D50 y claridad musical C80 que se ven afectados por la distribución de energía a lo largo del tiempo sobre la respuesta impulsional. En estos casos, a medida que aumenta la difusión se observa una mejora en ambos parámetros, tanto más apreciable cuanto menor es la absorción del recinto (Fig. 4 y 5).

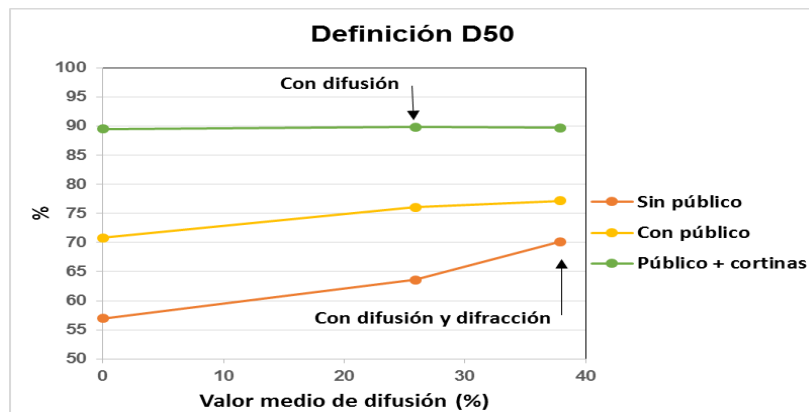


Fig. 4 Efecto de la difusión sobre D50 para diferentes valores de absorción

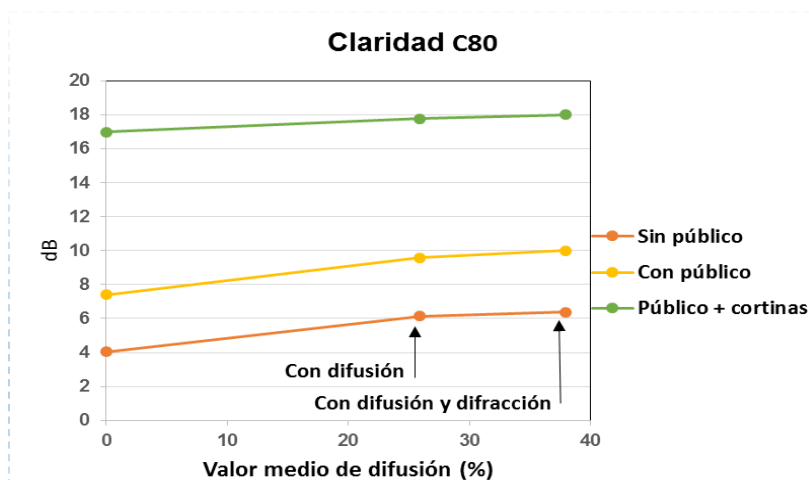


Fig. 5 Efecto de la difusión sobre C80 para diferentes valores de absorción

El mismo efecto se observa en los parámetros C50 y U50 que dependen de la distribución energética a lo largo de la respuesta impulsional. Para todos estos parámetros se constata pues el efecto favorable de la difusión del sonido en un recinto. En el resto de parámetros acústicos tales como STI, LF, SPL, G, la influencia de la difusión y la difracción es mucho menor.

### Bibliografía

- [1] M. R. Schroeder, Proceedings of the Fourth International Congress on Acoustics, Copenhagen, (1962), Paper M21.
- [2] A. Krokstad, S. Strøm, S. Sørdsal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", J. Sound Vibr. 8, 118 (1968).
- [3] H. Kuttruff, Room Acoustics. 4th edition. Taylor & Francis. London and New York, (2000).
- [4] I. Bork, "Report on the 3rd Round robin on room acoustical computer simulation. Part II: Calculations. Acta Acustica. Acustica 91 (4), (2005).
- [5] B. - I. Dalenbäck, CATT-Acoustic v9.0a. User's manuals, (2011).
- [6] M. Vorländer, "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties". JASA 133 (3) (2013).