

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL. PROCEDIMIENTO Y VALIDACIÓN

PACS: 43.55.RG

Martín Bravo M^a A¹.; Tarrero Fernández A.I.¹; Aparicio Colino A¹; González Suárez J².; Machimbarrena Gutiérrez M².

¹E.U. Politécnica. Universidad de Valladolid, C/ Francisco Mendizábal nº1, 470014 Valladolid
Tef:983-423500 Fax: 34 983 423490

e-mail: maruchi@sid.eup.uva.es, ana@sid.eup.uva.es

²E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Valladolid

ABSTRACT

The goal of this paper is to establish a procedure which allows to determine the structural reverberation time (t_r) for a room paraments, starting from in situ measures. The procedure includes the way of exciting the parament, to take the measures and to determine t_r . The results achieved verify the requirements demanded by the Normative to determine coefficients K_{ij} and it can be concluded that t_r diminishes with frequency and it tends to a nearly constant value above 1000 Hz. These values and tendencies match other experimental and theoretical values, which allows to establish the validity of the procedure.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es establecer un procedimiento para determinar el tiempo de reverberación estructural (t_r) de los paramentos de un recinto, a partir de medidas *in situ*, para obtener los K_{ij} . El procedimiento recoge la forma de: excitar el paramento, realizar las medidas y determinar t_r . Los resultados obtenidos se han comparado con los de un trabajo reciente y con el valor que predice un modelo teórico. Se puede concluir que t_r disminuye con la frecuencia, tendiendo a un valor prácticamente constante a partir de 1000 Hz, siendo los valores y las tendencias acordes con otros resultados experimentales y teóricos recogidos en la bibliografía, lo cual permite establecer la validez del procedimiento.

1 - INTRODUCCIÓN

El estudio de la transmisión del sonido entre dos recintos adyacentes comprende el análisis de las transmisiones directas (cuando el ruido generado en el recinto emisor alcanza el recinto receptor a través del paramento separador de ambos recintos) y el análisis de las transmisiones indirectas, laterales o por flancos (cuando el ruido que alcanza el recinto receptor lo hace a través de la propagación por los paramentos laterales). La contribución del primer tipo de transmisión ha sido objeto de numerosos estudios, y está perfectamente establecido el procedimiento para su determinación según la normativa vigente [1], [2]. Sin embargo, la contribución de cada uno de los caminos de transmisión indirecta presenta grandes dificultades, tanto desde el punto de vista experimental como teórico. Las transmisiones indirectas constituyen un campo de investigación muy interesante, ya que conocer el

mecanismo por el que se producen estas transmisiones, permitirá controlarlas y, en definitiva, disponer de mayor número de recursos para mejorar el aislamiento acústico entre recintos.

La contribución de las transmisiones indirectas queda determinada por el cálculo del índice de reducción estructural por flancos, K_{ij} . Una magnitud fundamental para el estudio, cálculo y determinación de este índice de reducción estructural por flancos, es el tiempo de reverberación estructural, T_s , que se define como el tiempo que debe transcurrir para que cuando se interrumpe la excitación en una estructura, el nivel de velocidad de vibración, L_v , de sus partículas disminuya 60 dB. El interés de las transmisiones indirectas pasa por el conocimiento del tiempo de reverberación estructural. Este parámetro puede determinarse a partir de medidas experimentales, o bien, puede calcularse a partir de un modelo teórico que aproxime el comportamiento del paramento. En este trabajo se muestra un procedimiento para la determinación experimental del tiempo de reverberación estructural.

2 - PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN ESTRUCTURAL

A continuación se va a describir el procedimiento que se ha seguido para realizar las medidas experimentales que nos han permitido determinar el tiempo de reverberación estructural en cada uno de los paramentos de las dos salas en las que se ha medido.

Las medidas se han realizado en un antiguo edificio de la Universidad de Valladolid (España). En la Figura 1 se muestra una representación de la vista en planta de las salas de ensayo, así como de la denominación utilizada para cada una de las paredes. También se han realizado medidas en los suelos y techos de ambas salas.

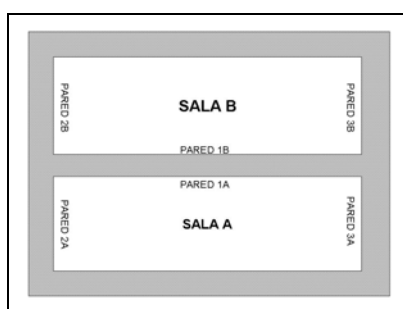


Figura 1. Vista en planta de las salas de ensayo y notación utilizada para cada uno de los paramentos

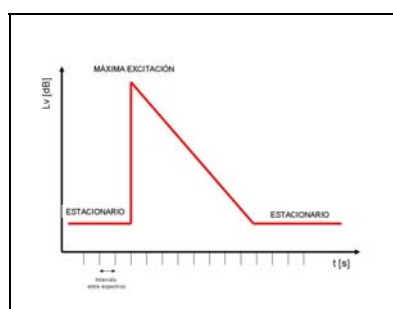


Figura 2. Variación ideal del nivel de velocidad de un paramento que recibe una excitación impulsiva

Las paredes verticales son fábrica de medio pie de ladrillo con un espesor de 15 cm con enfoscado y pintura por ambas caras, aportando una masa de 150 Kg/m^2 . Los forjados están compuestos de bovedilla de 25 cm más una capa de compresión de 5 cm, más mortero y cerámica con enfoscado y pintura por su parte inferior, dando un espesor de 37 cm y una densidad superficial de masa de 400 Kg/m^2 .

Las partículas de un paramento, en ausencia de excitación, poseen una vibración de fondo que origina un nivel de velocidad estacionario. Si en un instante determinado el paramento recibe una excitación de gran intensidad y corta duración, el nivel de velocidad de dicho paramento asciende de forma brusca hasta un valor máximo, y seguidamente desciende de manera prácticamente lineal hasta recuperar nuevamente el nivel de vibración estacionario. Esta situación ideal, recogida en la Figura 2, permite determinar el tiempo de reverberación estructural midiendo el tiempo necesario para que el nivel de velocidad de las partículas disminuya 20 ó 30 dB, y extrapolando el valor a una caída de 60 dB.

El comportamiento vibracional de un paramento varía con la frecuencia. Para cada una de las frecuencias que se consideren habrá una gráfica análoga a la representada en la figura 2, pero con distinta pendiente en la caída del nivel de velocidad, lo que dará distintos valores del tiempo de reverberación estructural para las distintas frecuencias.

Habitualmente, no es posible medir *in situ* una caída de 60 dB, debido a la magnitud de los niveles máximos de excitación obtenidos y a la vibración de fondo de los paramentos. Esta limitación puede salvarse si la caída del nivel de velocidad es lineal, o puede aproximarse a una línea recta. Los resultados experimentales que se presentan en este artículo ponen de manifiesto que esta propiedad de linealidad se cumple de forma aceptable, tanto para paramentos simples como para suelos y techos, y además, la linealidad de las gráficas es mayor para las frecuencias altas que para las bajas.

La forma que se ha utilizado para excitar el paramento consiste en impactar bruscamente con un martillo. Con este tipo de excitación se comprueba que el nivel de velocidad crece bruscamente hasta un valor máximo, y seguidamente decrece de forma prácticamente lineal, lo que nos va a facilitar la determinación del tiempo de reverberación estructural.

Para las medidas experimentales se ha utilizado un acelerómetro, tipo 4370 de Brüel&Kjaer, pegado al paramento mediante cera de abeja conectado a un analizador de espectros tipo 2148 de Brüel&Kjaer. Para cada una de las frecuencias es necesario realizar un número de medidas del nivel de velocidad que permita determinar de forma adecuada el tiempo de reverberación estructural para esa frecuencia. Esto se consigue mediante un *multiespectro*, que permite obtener un espectro del nivel de velocidad a intervalos de tiempo fijados.

Se han realizado medidas en tercios de octava desde 200 Hz hasta 5000 Hz, midiendo el nivel de velocidad de las partículas del paramento cada 0,005 segundos, hasta un total de 50 multiespectros. El analizador de espectros se programa estableciendo un umbral ligeramente inferior al máximo valor del nivel de velocidad (entre 2 y 3 dB por debajo del máximo), para que salte el *trigger* y el analizador comience a registrar las medidas. Para poder observar mejor la caída del nivel de velocidad, se impacta dos veces seguidas con el martillo, la primera excita el *trigger*, y la segunda proporciona el multiespectro para la determinación del tiempo de reverberación estructural.

En cada paramento se han realizado cuatro medidas, colocando el acelerómetro en distintos puntos del paramento, tratando de evitar los puntos próximos a puertas y ventanas, así como los puntos próximos a su contorno. Una vez obtenido el tiempo de reverberación estructural para cada punto de medida del paramento, se han promediado los cuatro valores para obtener el tiempo de reverberación estructural de ese paramento.

3 - RESULTADOS OBTENIDOS

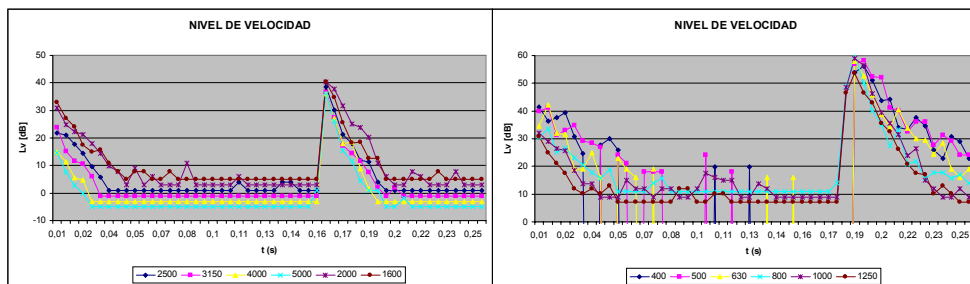


Figura 3. Nivel de velocidad de la pared 1A, para frecuencias altas (1600-5000 Hz)

Figura 4. Nivel de velocidad de la pared 1A, para frecuencias bajas (315-1250 Hz)

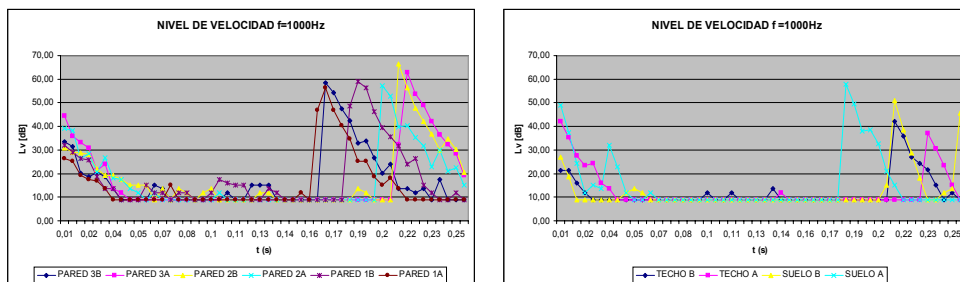


Figura 5. Nivel de velocidad de las paredes para f=1000 Hz.

Figura 6. Nivel de velocidad de suelos y techos para f=1000 Hz.

Con el procedimiento explicado anteriormente se han realizado medidas, en función de la frecuencia, para los distintos paramentos. En las figuras 3 y 4 se muestra la variación del nivel de velocidad con el tiempo, cuando se ha excitado la pared 1A mediante dos impactos consecutivos. Se comprueba que en las frecuencias altas, figura 3, el comportamiento del paramento es más próximo al ideal que en las bajas frecuencias, figura 4. La no linealidad en la caída del nivel de velocidad es más acusada para frecuencias por debajo de 500 Hz.

En las figuras 5 y 6 se recoge el comportamiento de los distintos paramentos para una única frecuencia, $f=1000$ Hz. Como se pone de manifiesto en estas figuras, el comportamiento es muy similar en las seis paredes consideradas, figura 5, así como en los suelos y los techos considerados, figura 6, pero es muy diferente entre las paredes y los techos o suelos.

Los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación estructural de los distintos paramentos considerados, se representan en función de la frecuencia en las figuras 7 y 8. Los valores que se obtienen están prácticamente todos en el rango comprendido entre 0,025 s y 0,25 s, mostrando una tendencia decreciente con la frecuencia, y variando muy poco para frecuencias superiores a 1000 Hz, donde todos los tiempos de reverberación estructural están muy próximos a 0,05 s. Los paramentos que menor tiempo de reverberación estructural poseen son los suelos de ambas salas, lo cual se justifica porque estos paramentos son los que poseen mayor masa, ya que las salas en las que hemos medido están en la planta baja del edificio.

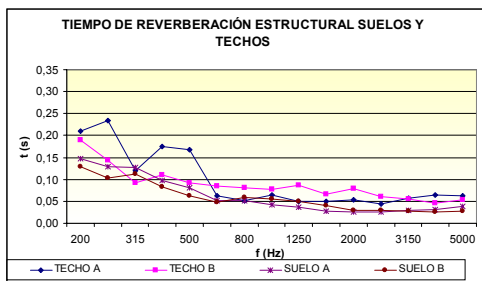


Figura 7. Tiempo de reverberación estructural, en función de la frecuencia, para suelos y techos

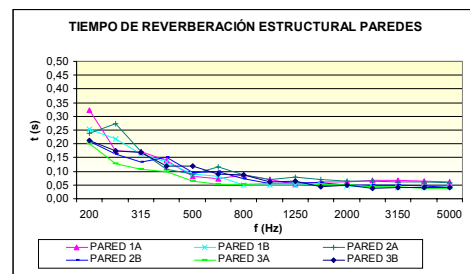


Figura 8. Tiempo de reverberación estructural, en función de la frecuencia, para paredes simples

4 - DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Cumplimiento de la Normativa

En la normativa [1], [2] aparecen unos criterios de verificación para el tiempo de reverberación estructural, que de no cumplirse, indicarían que las medidas realizadas no pueden utilizarse para el cálculo de los coeficientes K_{ij} . La normativa indica que el mínimo valor para el tiempo de reverberación estructural de un elemento j , está dado por la ecuación 1, y dice explícitamente que en el caso de que esa desigualdad no se cumpla, la medida de los coeficientes K_{ij} no es relevante.

$$T_{s,j} \geq \frac{5\sqrt{S_j}}{c_0 \sqrt{f_c}} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

Donde S_j es la superficie del elemento j en m^2 , c_0 es la velocidad del sonido en el aire en m/s , f es la frecuencia considerada en Hz y f_c es la frecuencia crítica en Hz , dada por la ecuación 2

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_j}{B_j}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

Siendo m_j la masa superficial del elemento de ensayo, y B_j se calcula a partir de la ecuación 3.

$$B_j = \frac{E_j \cdot h_j^3}{12(1 - \nu_j^2)} \quad (3)$$

Donde E_j es el módulo de Young del elemento j , expresado en Pascales, h_j es el espesor del paramento, en metros, y ν_j es el coeficiente de Poisson del paramento.

En las figuras 9 y 10 se representan los tiempos de reverberación estructural mínimos para cada paramento de la sala A. Además, en cada gráfica se muestran los tiempos de reverberación estructural medidos *in situ*, para que resulte más clara su verificación. En las figuras 11 y 12 se representan los tiempos de reverberación estructural mínimos y medidos para la sala B. En estas gráficas se observa que en todos los casos, y para todas las frecuencias, el tiempo de reverberación estructural medido se encuentra por encima del valor mínimo, con lo que las medidas cumplen el requisito del tiempo de reverberación estructural para que sean relevantes y puedan utilizarse para calcular los coeficientes K_{ij} .

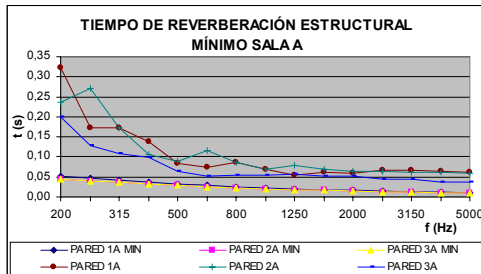


Figura 9 Tiempo de reverberación estructural de los paramentos simples de la sala A, y valores mínimos según la normativa

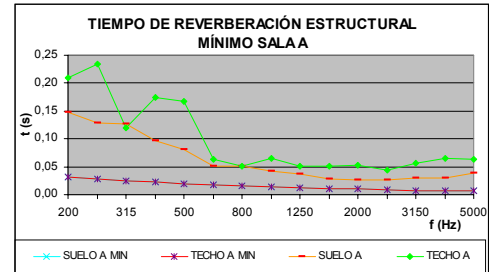


Figura 10 Tiempo de reverberación estructural de los suelos y techos de la sala A, y valores mínimos según la normativa

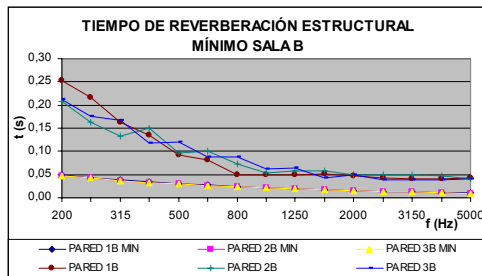


Figura 11 Tiempo de reverberación estructural de los paramentos simples de la sala B, y valores mínimos según la normativa

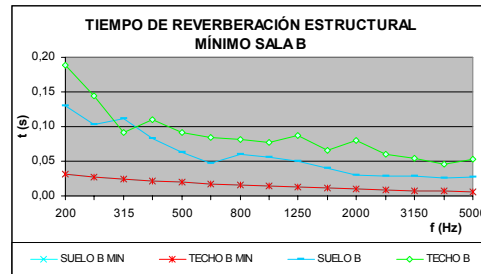


Figura 12 Tiempo de reverberación estructural de los suelos y techos de la sala B, y valores mínimos según la normativa

4.2 Comparativa con Valores Estimados Teóricamente

Según un estudio sobre el tiempo de reverberación estructural [3], éste se puede calcular teóricamente para cada frecuencia a partir del factor de pérdidas, mediante la ecuación 4.

$$T_s = \frac{2.2}{f \cdot \eta_{ref}} \quad [s] \quad (4)$$

Donde f es la frecuencia [Hz], y η_{ref} es el factor de pérdidas de referencia, cuyo cálculo está dado por la ecuación 5 donde m' la densidad superficial del elemento considerado [kg/m^2].

$$\eta_{ref} = 0.01 + \frac{m'}{800 \cdot \sqrt{f}} \quad (5)$$

Para poder aplicar la ecuación 4 es preciso conocer la masa por unidad de superficie de las paredes, suelos y techos, que en nuestro caso como ya hemos indicado anteriormente son $150 kg/m^2$ para las paredes y $400 kg/m^2$ para los suelos y techos.

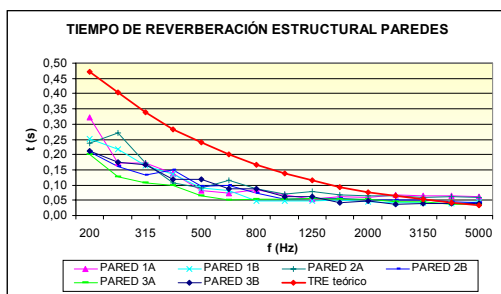


Figura 13. Tiempo de reverberación estructural teórico y medido *in situ*, para las paredes

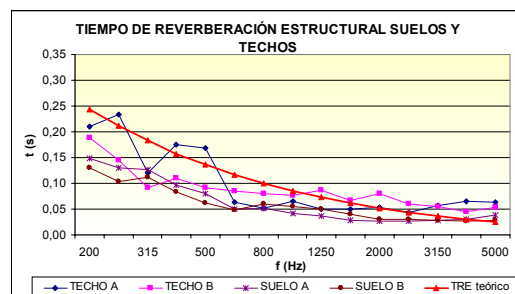


Figura 14. Tiempo de reverberación estructural teórico y medido *in situ*, para suelos y techos

En la figura 13 se representa el tiempo de reverberación estructural teórico y el medido, en los paramentos simples de las salas. Los resultados muestran que conforme aumenta la frecuencia los valores teóricos, son más próximos a los valores medidos, siendo mínima la diferencia entre ambos para frecuencias superiores a 1600 Hz.

En la figura 14 se realiza una representación análoga a la anterior, para el caso de suelos y techos de las dos salas consideradas. En esta figura también se observa que las diferencias entre los valores medidos y teóricos son menores a frecuencias altas, y en este caso los valores teóricos se aproximan más a los valores medidos *in situ* que en los paramentos simples. A medida que aumenta la masa por unidad de superficie los valores teóricos se acercan más a los valores medidos.

4.3 Comparación con Otros Resultados Experimentales

Existen resultados experimentales [4] que muestran valores del factor de pérdidas de referencia, un parámetro ligado directamente al tiempo de reverberación estructural según la Ecuación 4. En el caso citado se muestran valores del factor de pérdidas total, η_{tot} , en dB, con una referencia de 10^{-12} . Estos resultados experimentales se refieren a suelos y techos construidos con bloques y vigas, y se han obtenido excitando los paramentos con un martillo. En la figura 15 se muestra el factor de pérdidas calculado en nuestro procedimiento mediante el tiempo de reverberación medido *in situ*, para los paramentos de la sala A. Los resultados obtenidos en nuestro estudio concuerdan con los mostrados en la referencia [4], tanto en el rango de valores que este parámetro presenta (de 98 dB a 109 dB) como en la tendencia que aparece en las representaciones gráficas: valores constantes aproximadamente hasta la frecuencia de 1.000 Hz, y un fuerte descenso desde 1.000 Hz hasta 5.000 Hz.

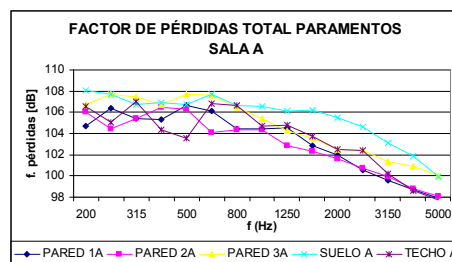


Figura 15. Factor de pérdidas total para los paramentos de la sala A

5 – CONCLUSIONES

De los resultados de las medidas *in situ* del tiempo de reverberación estructural, y del análisis de estos valores, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Los valores obtenidos cumplen satisfactoriamente la exigencia de la normativa para que puedan ser utilizados en la determinación de los coeficientes K_{ij} .
- El rango de los valores obtenidos presenta un acuerdo aceptable, tanto con otros datos experimentales como con valores estimados teóricamente.
- Se constata experimentalmente el decaimiento del t_r con la frecuencia, de acuerdo con las predicciones teóricas.
- En el caso de frecuencias bajas el procedimiento utilizado da peores resultados que para las medias y altas.
- Por todo ello, el procedimiento de medida utilizado en este trabajo es adecuado para la determinación experimental del tiempo de reverberación estructural, como paso previo al cálculo de los coeficientes K_{ij} .

TRABAJO REALIZADO CON EL PROYECTO CON REFERENCIA: BIA2004-07102-C03-03

BIBLIOGRAFÍA

[1] UNE-EN 12354-1 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1

- [2] UNE-EN 12354-2 Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2
- [3] Gerretsen, E. Using the structural reverberation time in standardizing laboratory measurements of the sound reduction index. PACS REFERENCE: 43.55 Rg
- [4] Hopkins, C. Airborne sound insulation of beam and block floor: Direct and Flanking Transmission". Building Acoustics Vol 11, number 1. Pg. 1-25. 2004