

La protección frente al ruido de los forjados proyectados por Eduardo Torroja en la E.T.S. de Arquitectura de la Ciudad Universitaria de Madrid

Protection against noise in concrete slabs designed by Eduardo Torroja in the E.T.S. School of Architecture in the Ciudad Universitaria in Madrid

C. Díaz^(*), D. Caballol^(**), A. Díaz^(*)

RESUMEN

En este trabajo se exponen y se analizan los resultados de las mediciones acústicas del aislamiento acústico a ruido aéreo y a ruido de impactos de los forjados de hormigón armado macizo, proyectados por D. Eduardo Torroja Miret y fabricados en la primera mitad de los años 1930 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPM, situada en la Ciudad Universitaria de Madrid.

Los valores experimentales obtenidos de los parámetros acústicos: índice ponderado de reducción acústica aparente $R'w$ y nivel de presión acústica ponderado de impactos normalizado $L'_{n,w}$ están bien relacionados con los previstos por las estimaciones en los modelos de cálculo de las normas europeas EN 12354 partes 1, 2:2000. Se ha obtenido una relación experimental de reciprocidad para la suma de los valores del índice de reducción acústica aparente y el nivel de presión sonora de impactos normalizado.

SUMMARY

This work presents and analyses the results of the acoustic measurements of insulation from airborne noise and impact noise in solid reinforced concrete slabs designed by Eduardo Torroja Miret and manufactured in the first half of the 1930s in the School of Architecture of the UPM Polytechnic University in Madrid, located in the Ciudad Universitaria in Madrid.

The experimental values for the acoustic parameters: weighted apparent sound reduction index $R'w$ and weighted normalised impact sound pressure level $L'_{n,w}$ are closely related with those predicted by the estimations in the calculation models in the European standards EN 12354 parts 1, 2:2000. An experimental reciprocity relation was obtained for the sum of the values of the apparent sound reduction index and the normalised impact sound pressure level.

343-08

Palabras clave: Forjados de hormigón armado, aislamiento a ruido aéreo, aislamiento a ruido de impactos.

Keywords: Reinforced concrete slabs, airborne sound insulation between rooms, impact sound insulation of floors.

^(*) E.T.S. de Arquitectura Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, (España)

^(**) E U de Arquitectura Técnica Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, (España)

1. INTRODUCCIÓN

De 1930 a 1936 la actividad profesional de D. Eduardo Torroja Miret se centró casi exclusivamente en las estructuras de edificación en colaboración con arquitectos que trabajaban en construcción de la Ciudad Universitaria de Madrid. Su obra ha sido estudiada y analizada por diferentes autores (1), (2), (3), (4). En este trabajo se exponen y se analizan por primera vez los resultados experimentales in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo y a ruido de impactos de los forjados modulares proyectados por D. Eduardo Torroja Miret y fabricados in situ en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPM.

el nivel de presión sonora de impactos normalizado L'_n , obtenido de la expresión [2].

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{10 \text{ m}^2} \text{ dB} \quad [2]$$

Donde:

L_i es el nivel de presión sonora de impactos en bandas de frecuencia, medido en el recinto receptor, en dB, cuando el suelo objeto de estudio está excitado por una máquina de impactos normalizada. A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2 .

2. LOS RECINTOS OBJETO DE ESTUDIO

El edificio original de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura fue inaugurado en 1936 y en su proyecto colaboraron el arquitecto D. Pascual Bravo y el ingeniero D. Eduardo Torroja. El edificio es de estructura de hormigón armado en pórticos de vigas y soportes organizados sobre una trama regular que se repite en todos los pabellones. En el edificio el elemento horizontal de separación entre las aulas está formado por un forjado de losa de hormigón y vigas de cuelgue dispuestas transversalmente al desarrollo del pabellón, con un acabado de pavimento de terrazo. En la parte inferior el forjado está guarnecido y enlucido.

Tabla 1
Datos geométricos de los recintos estudiados

Ensayo	Recintos	Largo, m	Ancho m	Alto m	Volumen m^3	Área superficie común, m^2
1	Aula 1G1	19	6,58	3,53	442,6	102,3
	Aula 0G1	22,5	6,67	3,53	524,2	
2	Aula 1G2	19,2	6,57	3,54	446	126
	Aula 0G2	22,3	6,58	3,54	520	
3	Aula 2G3	19,1	6,58	3,54	445,6	128
	Aula 1G3	23,2	6,58	3,56	544	
4	1 Conserjería	3,3	6,57	3,55	77	21,7
	0 Conserjería	3,3	6,57	3,55	77	

Las mediciones acústicas se han realizado en varios recintos superpuestos mediante aplicación de las normas UNE EN ISO 140 –Partes 4, 7 (5),(6) y UNE EN ISO 717– Partes 1 y 2.(7),(8).

Como magnitudes relevantes para expresar el aislamiento a ruido aéreo entre recintos se ha utilizado el índice de reducción acústica aparente R' , calculado de las mediciones acústicas de acuerdo con la fórmula [1].

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB} \quad [1]$$

Donde:

L_1 y L_2 son los niveles de presión sonora promedios medidos en los recintos emisor y receptor respectivamente, en dB. S es el área del elemento separador entre recintos, en m^2 y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2 . En la evaluación del nivel de ruido de impactos entre los recintos se ha utilizado

Según la documentación del proyecto, la losa con su acabado de suelo tiene un espesor de 12 cm y sobre la misma se encuentra ejecutado un pavimento de terrazo continuo in situ de 2 cm de espesor. Las medidas de las vigas de cuelgue son 35 cm de ancho, 40 cm de canto, y la distancia al eje del entrevigado es de 320 cm. Tanto la losa como la viga se encuentran acabadas inferiormente con un guarnecido y enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor. La densidad volumétrica del hormigón armado utilizado es de 2.500 kg/m^3 . La masa por unidad de superficie de la losa es de 300 kg y la de la losa con las vigas de cuelgue de 410 kg.

En la Tabla 1 se muestran las dimensiones geométricas de los recintos estudiados que están situados en diferentes plantas del edificio. En las aulas donde se han realizado los ensayos acústicos el área de la superficie horizontal común de separación es superior a 100 m^2 y tienen 6/7 vigas de cuelgue. También se han realizado ensayos acústicos entre dos recintos de pequeñas dimensiones, donde la losa de hormigón está delimitada entre dos vigas de cuelgue.

En las Figuras 1 y 2 se muestran detalles constructivos de los elementos horizontales de separación.

1. Detalle constructivo del elemento de separación horizontal entre recintos



3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Al ser las dimensiones de los recintos utilizados como aulas mayores que las de los recintos habituales en los edificios de uso residencial, en las mediciones acústicas del aislamiento a ruido aéreo se han utilizado tres posiciones de fuente sonora, quince posiciones para las medidas de L_1 y L_2 , 24 posiciones para la medida del tiempo de reverberación T_2 . En el caso de la máquina de impactos se han utilizado 8 posiciones. El tiempo de promediado de cada medida ha sido de 30 segundos.

En las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados experimentales de las mediciones del índice de reducción acústica aparente R' y del nivel de presión sonora de impactos normalizado L'_n en el rango de frecuencias de un tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz, así como los valores globales ponderados de dichas magnitudes con sus términos de adaptación de espectros.

En la tabla 2, para las aulas se muestran los valores medios junto con sus desviaciones típicas, del índice de los parámetros acústicos R' , L'_n y su suma $R' + L'_n$.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Aislamiento a ruido aéreo

Las mediciones acústicas del índice de reducción acústica aparente entre los recintos muestran que el valor medio del índice ponderado de reducción acústica aparente

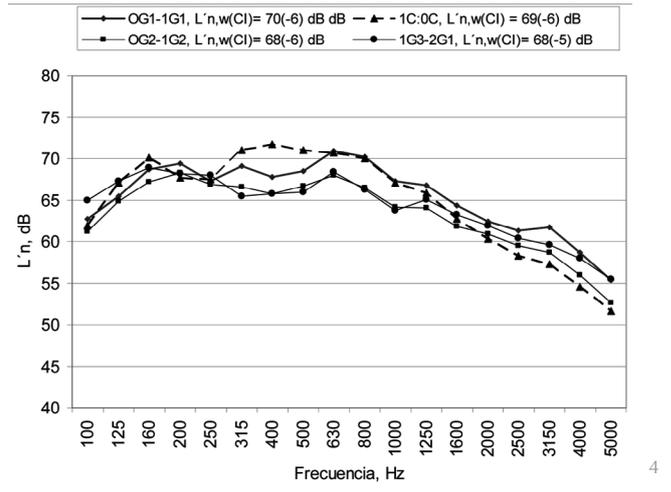
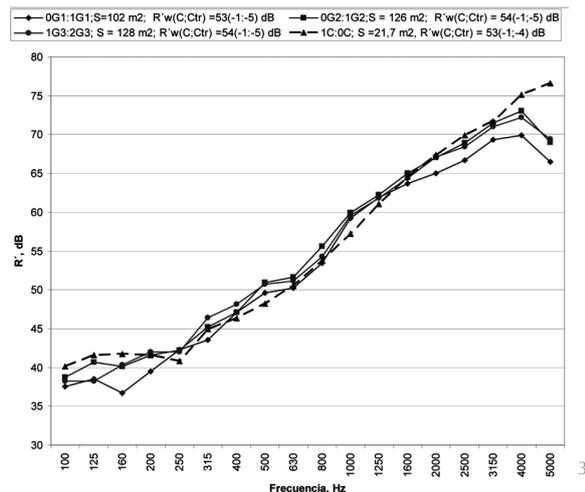
reducción acústica aumenta en más de 7 dB por cada banda de octava. En la Tabla 2 se puede comprobar que la desviación típica de los valores de R' tiene un valor medio de 2,2 dB y su rango varía entre 1,3 dB y 3,3 dB en las diferentes bandas de frecuencia central en tercios de octava.

A partir de ensayos realizados a lo largo de los años en diferentes laboratorios europeos, para elementos de construcción monolíticos la Norma UNE EN 12354-1(9) proporciona una ley de masa teórica para calcular el índice ponderado de reducción acústica ponderado

2. Vista del interior de un aula hace años, donde se muestran las vigas de cuelgue.

3. Índice de reducción acústica aparente R' de los forjados analizados.

4. Nivel de presión sonora de impactos normalizado L'_n en los recintos objeto de ensayo.



es $R'_w(C;C_{tr}) = 53(-1;-5)$ dB. En la Figura 3 se observa el efecto de coincidencia a bajas frecuencias, por debajo de la banda de tercio de octava de frecuencia central 250 Hz y que el índice de reducción acústica aparente R' de los diferentes ensayos realizados muestra valores muy parecidos en todas las bandas de frecuencia, se comprueba que por encima de la zona de coincidencia el índice de

R_w en función de la masa por unidad de área m' , calculado de los valores en bandas de octava de acuerdo con la norma UNE EN ISO 717-1, ésta ley es [3].

$$R_w = 37.5 \log\left(\frac{m'}{1 \text{ kg/m}^2}\right) - 42 \text{ dB}, m' > 150 \text{ kg/m}^2 \quad [3]$$

5. Comparación de los índices de reducción acústica aparentes promedios y el índice de reducción acústica teórico, supuesto isótropo el sistema constructivo losa de hormigón con vigas de cuelgue.

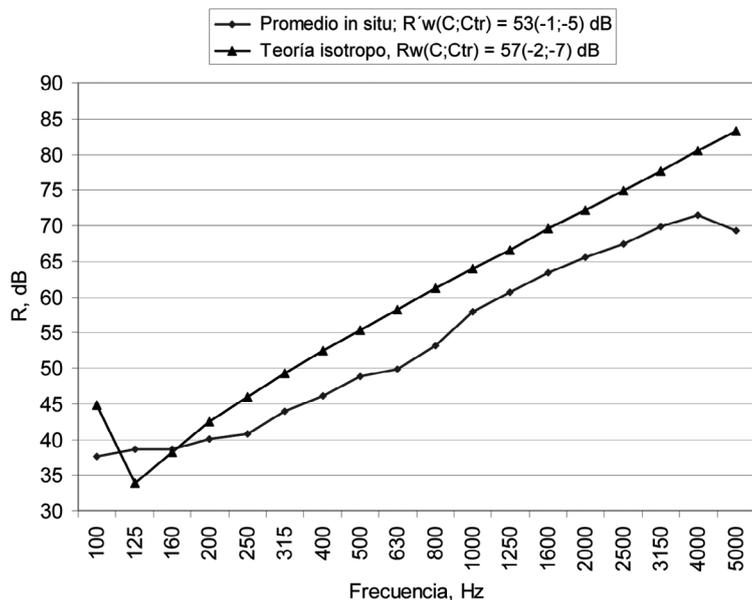
Tabla 2
Valor medio y desviación típica del índice de reducción acústica aparente R'_n del nivel de presión sonora de impactos normalizado $L'_{n,w}$ y de la suma $R'+L'_n$

Frecuencia Hz	R' , dB		L'_n , dB		$R'+L'_n$, dB	
	Promedio	Desviación Típica	Promedio	Desviación Típica	Promedio	Desviación Típica
100	37,6	1,3	62,7	0,6	100,3	4,8
125	38,7	1,4	66,2	1,1	104,9	4,3
160	38,7	1,8	68,7	1	107,4	5,3
200	40,1	2,2	68,4	1,2	108,5	4,2
250	40,8	2,8	67,4	0,1	108,2	3,7
315	44	2,5	68,1	1,3	112	3,2
400	46,1	2,8	67,8	2,8	113,9	3
500	48,8	3,3	68,1	1,8	116,8	3,1
630	49,8	2,4	69,5	0,1	119,3	2,8
800	53,2	2,6	68,3	0,1	121,5	2,5
1000	57,9	3,3	65,6	0,6	123,5	2,1
1250	60,7	2,6	65,5	0,6	126,1	2,6
1600	63,4	2,1	63	1,1	126,4	3,3
2000	65,6	1,9	61,4	1,5	127	4,2
2500	67,4	1,5	59,9	2,1	127,3	3,9
3150	69,8	1,9	59,3	3,1	129,1	3,3
4000	71,5	1,4	56,8	3	128,3	4,2
5000	69,3	2,4	53,8	2,7	123,1	4,8

Al sustituir en la ecuación anterior se obtienen, para el sistema losa de hormigón con vigas de cuelgue el valor teórico $R_w = 56$ dB. En la Figura 5 se muestran los resultados de los cálculos teóricos del índice de reducción acústica (10) para el sistema losa de hormigón con vigas de cuelgue, estos se han realizado considerando que la transmisión del sonido entre los recintos es directa y que el sistema se puede sustituir por una losa de hormigón homogénea, considerada delgada, de la misma masa y espesor 16,4 cm, en este caso la frecuencia crítica de coincidencia está alrededor de 114 Hz. La expresión teórica proporciona un valor $R_w = 57$ dB. En esta

figura se comparan los resultados teóricos con resultados experimentales promedios del índice de reducción acústica aparente. Se puede considerar, de manera aproximada, que la desviación de los valores promedios medidos respecto a los obtenidos según la teoría está producida por las transmisiones indirectas del sonido entre los recintos.

Aunque el sistema losa de hormigón con vigas de cuelgue es ortotropo, no se ha tenido en cuenta en los cálculos teóricos, pues las dos frecuencias críticas de coincidencia aparecen en las dos primeras bandas de frecuencia, por lo que no influyen en los resultados globales. A frecuencias superiores a 3.800 Hz el sistema constructivo no se puede considerar delgado y el valor teórico del índice de reducción acústica R , debería ser algo inferior al calculado, al tener en cuenta las ondas de cizalladura. Por otra parte, el cálculo del índice ponderado de reducción acústica R_w de acuerdo con la norma UNE EN ISO 717-1 se realiza entre 100 Hz y 3.150 Hz.



4.2. Nivel de ruido de impactos

Las mediciones acústicas del nivel de presión sonora de impactos normalizado $L'_{n,w}$, de cada uno de los ensayos realizados, representados en la Figura 3, presentan unas curvas parecidas. El cálculo del nivel de presión acústica ponderado de impactos normalizado promedio es $L'_{n,w}(C_i) = 69(-5)$ dB. En la Tabla 2 se puede comprobar que la desviación típica de los valores de L'_n tiene un valor medio de 1,4 dB y su rango varía entre 0,1 dB y 3,1 dB en

las diferentes bandas de frecuencia central en tercios de octava.

La norma UNE EN 12354-2 (11) propone un modelo simplificado para predecir el nivel normalizado de presión sonora de impactos normalizado para recintos superpuestos separados por un elemento horizontal homogéneo. La ley de masa está dada por [4].

$$L'_{n,w} (EN 12354-2) = 164 - 35 \log\left(\frac{m'}{1 \text{ kg/m}^2}\right) - K \quad \text{dB, } m' > 100 \text{ kg/m}^2 \quad [4]$$

Donde K es la corrección, en dB, por la transmisión de ruidos de impacto sobre las construcciones de flancos supuestas homogéneas. En los recintos ensayados, K = 3 dB. Al sustituir en la ecuación anterior se obtiene $L'_{n,w} = 69 \text{ dB}$. Los valores medidos correlacionan muy bien con los propuestos en el modelo simplificado de la norma europea.

4.3. Relación entre el índice de reducción acústica aparente y el nivel de presión sonora de impactos normalizado

Para sistemas constructivos homogéneos los aislamientos acústicos a ruido aéreo y a ruido de impactos están relacionados mediante una ley de reciprocidad, de forma que la suma del índice de reducción acústica y el nivel de presión sonora de impacto normalizado depende únicamente de la frecuencia, si las transmisiones forzadas no se tienen en consideración (12),(13). En laboratorio, la relación de reciprocidad en bandas de frecuencia de tercio de octava sigue la expresión [5].

$$R + L_n = 43 + 30 \lg\left(\frac{f}{1\text{Hz}}\right) \quad \text{dB} \quad [5]$$

Donde f es la frecuencia central de la banda de tercio de octava en Hercios.

Un valor global ponderado se puede deducir de la ecuación [5] (14).

$$R_w + L_{n,w} = 126 \pm 2 \quad \text{dB} \quad [6]$$

En la tabla 2 se muestra la suma de los valores experimentales medidos *in situ* del índice de reducción acústica aparente y el nivel de presión sonora de impactos normalizado. Basados en los datos obtenidos en bandas de octava de frecuencias centrales entre [125 Hz, 2.000 Hz] la ecuación experimental obtenida es [7].

$$L'_n + R' = 68 + 20 \log\left(\frac{f}{1\text{Hz}}\right) \quad \text{dB} \quad [7]$$

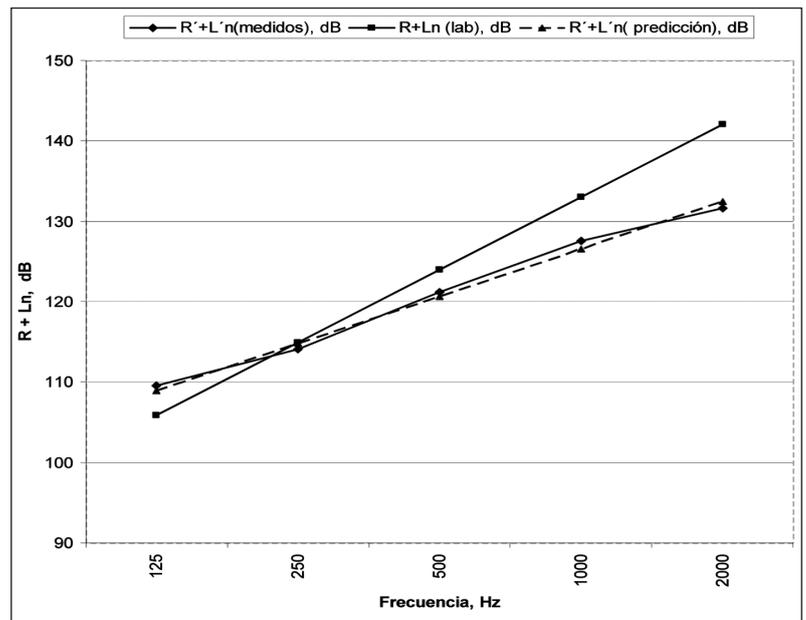
La suma de R' y L' n menos veinte veces el logaritmo decimal de la frecuencia en bandas de octava es una constante, llamada constante de reciprocidad. Para este tipo

de elementos horizontales de separación entre recintos, la constante de reciprocidad es 68. Estos valores son semejantes a los obtenidos en el caso de forjados con vigas de hormigón y bovedillas cerámicas con un acabado de trazo o parquet (15), cuya ecuación experimental se muestra en la ecuación [8].

6. Comparación en bandas de octava, entre la suma de of L_n + R en laboratorio, L' n + R' previstos y L' n + R' medidos.

$$L'_n + R' = 66 + 20 \log\left(\frac{f}{1\text{Hz}}\right) \quad \text{dB} \quad [8]$$

En la Figura 6 se muestran en bandas de octava los valores de la suma de L_n + R_n en laboratorio, ecuación [5], los valores previstos o estimados según la ecuación [7] y los valores promedios *in situ*. El ajuste entre los valores experimentales y los previstos es excelente. A partir de la fórmula obtenida en la ecuación [7], la Figura 7 muestra, para bandas de octava, la constante de reciprocidad para el índice de reducción acústica aparente y el nivel de presión acústica de impactos normalizado.

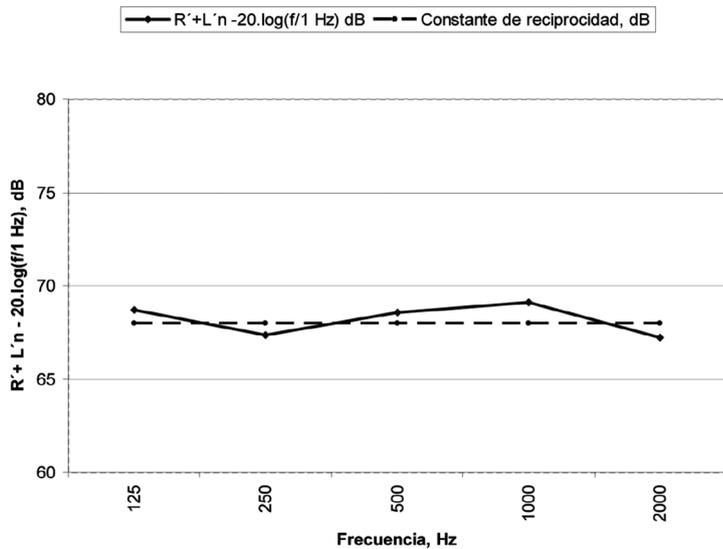


5. CONCLUSIONES

En este apartado se muestran algunas conclusiones sobre el comportamiento acústico de los forjados de hormigón armado macizo fabricado *in situ*, que fueron de los primeros que se realizaron en España en la primera mitad de los años 1930 durante la construcción de la Ciudad Universitaria de Madrid. En estas fechas no existía ninguna norma española oficial que regulara la construcción de los mismos.

Algunas conclusiones sobre el comportamiento acústico de este tipo de forjados son las siguientes:

Los valores experimentales del índice de reducción acústica aparente R' muestran que



7. Constante de reciprocidad versus el índice de reducción acústica aparente mas el nivel de presión acústica de impactos normalizado.

aunque el sistema losa de hormigón con vigas de cuélgue es ortotropo, su comportamiento acústico a ruido aéreo se puede explicar de forma aproximada como el de una losa de hormigón homogénea equivalente de la misma masa y considerada delgada. En las curvas del índice de reducción acústica en función de la frecuencia se observa claramente el efecto

de coincidencia y que por encima de esta zona el índice de reducción acústica aparente aumenta en más de 7 dB por cada banda de octava. Como es usual, los valores de R'_w son menores que los R_w en aproximadamente 4 dB, debido a las transmisiones acústicas indirectas.

Las desviaciones típicas de los datos experimentales en las bandas de frecuencia central en tercios de octava son para R' de 2,2 dB y para L'_n de 1,4 dB.

Los valores experimentales obtenidos de los parámetros acústicos índice ponderado de reducción acústica aparente R'_w y nivel de presión acústica ponderado de impactos normalizado $L'_{n,w}$ están bien relacionados con los previstos por las estimaciones de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos especificadas en los modelos de cálculo de las normas europeas UNE EN 12354 partes 1 y 2:2000.

Se ha obtenido una relación experimental de reciprocidad para la suma de los valores del índice de reducción acústica aparente y el nivel de presión sonora de impactos normalizado. Estos valores son semejantes a los obtenidos en el caso de forjados con vigas de hormigón y bovedillas cerámicas con un acabado de terrazo o parquet.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Antuña, J.: *Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret*, Madrid, E.T.S.A., U.P.M. 2002 Tesis doctoral.
- (2) AA.VV.: *Informes de la construcción*, nº 137, 1962. CSIC. Madrid. España.
- (3) AA.VV.: *La obra de Eduardo Torroja*, Instituto de España, 1977.
- (4) Torroja, J. A.: "La Vigencia de un Legado", pp. 79-93. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2002.
- (5) UNE EN ISO 140-4, Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms (ISO 140-4: 1998).
- (6) UNE EN ISO 140-7, Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact insulation of floors. (ISO 140-7: 1998).
- (7) UNE EN ISO 717-1, Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:1996). EN ISO 717-1. Amended 1: Rounding rules related to single number ratings and single number quantities. 2006. (ISO 717-1:1996/AM1:2006).
- (8) UNE EN ISO 717-2: 1996, Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (ISO 717-2:1996). EN ISO 717-2: Amended 1:2006 (ISO 717-2:1996/AM 1:2006).
- (9) UNE EN 12354-1, Building Acoustics, Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements, Part 1: Airborne sound insulation between rooms, CEN, Brussels, 2000.
- (10) Ver, I.; Beranek, L.: *Noise and Vibration Control Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- (11) UNE EN 12354-2, Building Acoustics, Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements, Part 2: Impact sound insulation between rooms, Brussels, 2000.
- (12) Heckl, M., Rathe, E. J.: *Relationship between the transmission loss and the impact noise insulation of floor structures*. JASA 1963, 35: 1825-1830.
- (13) Cremer, L., Heckl, M.: *Structure Borne Sound*, 2nd edition, Berlin, Springer Verlag, 1988.
- (14) Gerretsen, E.: *Calculation of airborne and sound insulation between dwellings*. Applied Acoustics. 1985, 19: 245-264.
- (15) Díaz, C.; Pedrero, A.: Field measurements of Airborne and Impact Sound Insulation Between Rooms, One on Top of the Other, with Beam and Pot Floor Structures. Acta Acustica United with Acustica, vol. 90 (2004), 982-986.
