

**Aislamiento acústico a ruido aéreo de techos bajo ensayo in situ. Propuesta
teórica metodológica**
**Air borne soundproofing of roofs through on-site testing. Theoretical-
methodological proposal**
**Isolamento acustico al rumore aereo di tetti con prove in situ. Proposta
teorico-metodologica**

***Lesvia Perez Laurens**
perezLaurens@gmail.com

****Ede Coromoto Martínez de Adrianza**
edecmartinez@gmail.com

***** Celso E. Llimpe Quintanilla**
cllimpe@pucp.edu.pe

*Arquitecta, profesora de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia. Magíster Scientiarum en Informática en Arquitectura. Doctora en Ciencias de la Educación. Postdoctorado en Arquitectura.



**Arquitecta, profesora de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia. Magíster Scientiarum en Arquitectura, Mención Computación en Arquitectura. Diploma de Estudios Avanzados en Teoría de la Señal y Comunicaciones.



***Licenciado en Ciencias Físicas, profesor de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, investigador en Acústica adscrito al Laboratorio de Acústica del Departamento de Ciencias de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Diploma de Estudios Avanzados en Teoría de la Señal y Comunicaciones. Diplomado de postgrado en Ingeniería Acústica. Magíster en Física Aplicada. Doctor en Ingeniería Acústica.



Resumen

Desde una perspectiva sistémica, interdisciplinaria y compleja se desarrolló una propuesta teórico metodológica para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de techos bajo ensayo in situ, utilizando el método global con altavoz, adaptando la metodología establecida para las fachadas en las normas internacionales ISO 140-5 e ISO 717-1. La propuesta se estructura en tres partes: en la primera se describe el módulo experimental y la plataforma tecnológica requerida; en la segunda se abordan los procedimientos para medir los niveles de presión sonora, niveles de ruido de fondo y los tiempos de reverberación, en bandas de frecuencia de un tercio de octava; en la tercera parte se calculan los promedios de estos parámetros acústicos, la diferencia de niveles estandarizada, el índice de reducción sonora aparente con sus valores globales y el término de adaptación del espectro sonoro. Paralelamente, se diseñaron instrumentos para el registro de la información y modelos que faciliten la experimentación in situ del aislamiento acústico de techos. La metodología se aplicó a tres prototipos de techos ecológicos variando las posiciones de la fuente sonora detectándose que ésta se debe ubicar a una distancia menor o igual a 7 m para que la energía sonora se enfoque directamente a la muestra y se minimice la transmisión de las ondas hacia otras superficies. La investigación plantea retos desde el punto de vista ambiental, permite cuantificar el aislamiento acústico de los techos y mejorar la calidad de vida en áreas urbanas.

Palabras clave: aislamiento acústico en techos, ensayos in situ, ruido aéreo, propuesta teórico metodológica.

Abstract

From a complex, interdisciplinary and systemic perspective a theoretical-methodological proposal to determine air borne soundproofing through in situ tests was developed using the global speaker method and adapting the established methodology for facades according to the international standards ISO 140-5 e ISO 717-1. The proposal was structured in three parts: the experimental module as well as the technological platform were described in the first part; procedures to measure levels of sound pressure, levels of background noise and reverberation times in frequencies bands of a third octave were stated in the second part, while in the third part, averages of those acoustic parameters were calculated as well as the difference of standardized levels, apparent sound reduction index with its global values and the adaptation term of sound spectrum. Likewise, instruments to record information and models were designed in order to facilitate on-site

experimentation of roofs' soundproofing. The methodology was applied to three prototypes of green roofs varying the position of sound source. It was detected that this must be located at a distance less or equal to 7 m so sound energy focus directly to the sample and it minimizes transmission of waves towards other surfaces. This research states challenges from the environmental point of view, it allows quantifying roofs' soundproofing and improves quality of life in urban areas.

Keywords: roofs' soundproofing, on-site testing, air borne, theoretical-methodological proposal.

Riassunto

Da una prospettiva sistémica, interdisciplinare e complessa, si è sviluppata una proposta teorico-metodologica per determinare l'isolamento acustico al rumore aereo di tetti con prove in situ, usando il metodo globale con altoparlante e adattando la metodologia stabilita per le facciate secondo le norme internazionali ISO 140-5 e ISO 717-1. La proposta si è strutturata in tre parti: nella prima, il modulo sperimentale e la piattaforma tecnologica richiesta sono stati descritte; nella seconda, si sono considerati i procedimenti per misurare i livelli di pressione sonora, livelli di rumore di fondo e i tempi di risonanza in bande di frequenze di un terzo di ottava; e nella terza parte, si sono calcolati le medie di questi parametri acustici, la differenza standardizzata di livelli, l'indice di riduzione sonora apparente con i suoi valori globali e il termine di adattamento dello spettro sonoro. Parallellamente, si sono disegnati degli strumenti per il registro dell'informazione e modelli che facilitino l'esperimento in situ dell'isolamento acustico di tetti. La metodologia si è applicata a tre prototipi di tetti ecologici variando le loro posizioni della fonte sonora, e si è notato che questa va localizzata ad una distanza minore o uguale a 7 m in modo che l'energia sonora si focalizzi direttamente sul campione e venga minimizzata la trasmissione delle onde verso altre superficie. La ricerca stabilisce sfide dal punto di vista ambientale, permette quantificare l'isolamento acustico dei tetti y migliorare la qualità di vita in aree urbane.

Parole chiave: isolamento acustico in tetti, prove in situ, rumore aereo, proposta teorico-metodologica.

INTRODUCCIÓN

El elevado aumento de la población en las últimas décadas ha generado un rápido crecimiento urbano y un incremento de los niveles de ruido en las ciudades sobre todo los ruidos aéreos (los que se propagan por el aire) ocasionados por el tráfico de vehículos y de aeronaves (Arau, 1999; Recuero, 1999, García y Garrido, 2003; Bies y Hansen, 2009; Van Renterghem y Botteldooren, 2009). En Venezuela, el control de ruido ha aumentado debido a una mayor conciencia del tema acústico que mejora el bienestar/calidad de vida urbana y de ciudadanos (COVENIN N° 1433, 1981; Decreto N° 2217,1992; COVENIN N° 1565,1995). A nivel internacional, distintas normas abordan el aislamiento acústico de las edificaciones, con el objetivo de disminuir los ruidos transmitidos entre recintos y los que puedan penetrar a través del techo y las fachadas, ya sean ruidos aéreos o de impacto.

El aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción de una edificación puede obtenerse en el laboratorio (ISO 140-3,1995), o a través de mediciones in situ (ISO 140-5, 1998; ASTM International, 2004; ASTM International, 1987; AFNOR, 1982; Frutos y Olaya, 2007), empleando modelos teóricos de predicción o software de simulación (Meza, 2007). Existen normas para el aislamiento acústico bajo ensayo in situ de las fachadas (ASTM International, 2004; AFNOR, 1982; ISO 140-5:1998) pero no para los techos.

“La normativa internacional de medición de aislamiento acústico in situ ha dejado en evidencia que los diversos procedimientos de medida y evaluación del aislamiento acústico, el método de ingeniería de normas ISO 140 es el más preciso y detallado al momento de uniformar criterios que favorece una mayor precisión de los resultados y una mayor repetitividad en el ensayo” (Meza, 2007: 105).

En el aislamiento a ruido aéreo in situ se puede usar como fuente sonora el ruido de tráfico existente en el lugar: vehicular, de trenes o aeronaves. Adicionalmente, se pueden usar altavoces como fuente sonora artificial, con este método se logran resultados más precisos que utilizando el método de ruido de tráfico cuyos resultados tienden a ser menos precisos (ISO 140-5,1998; Meza, 2007). En las mediciones con altavoces se describe el método para elementos de fachadas (por ejemplo una ventana) y el método global con altavoces (para una fachada completa).

Es importante destacar que en las mediciones del aislamiento acústico a ruido aéreo se emplea el ruido blanco o el ruido rosa. El primero es un ruido cuya potencia es constante en toda la gama de frecuencias audibles o bandas lineales mientras que en una escala logarítmica de bandas de octavas el ruido blanco aumenta en potencia 3 dB por octava (Frutos y Olaya 2007). El ruido rosa es una señal cuyo contenido de energía por frecuencia disminuye en 3 dB, si el eje de frecuencias sigue una escala lineal. En el espacio logarítmico el ruido rosa se filtra para dar igual potencia por octava o por tercio de octava. Por esta razón, el ruido rosa es el más utilizado para ecualizar los sistemas de sonido y mediante analizadores de espectro o software, obtener una respuesta lo mas plana posible del conjunto sonoro (López, 2008).

A partir de estas consideraciones se desarrolló este trabajo, cuyo objetivo es elaborar una propuesta teórico metodológica para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de

techos bajo ensayo in situ, utilizando el método global (todo el techo) con altavoces, adaptando la metodología establecida para fachadas en la Norma Internacional ISO 140-5 y el método para calcular los valores globales de aislamiento acústico descrito en la Norma ISO 717-1.

Luego de interpretar las normas internacionales antes mencionadas, las teorías de referencia, las entrevistas a expertos y las experiencias experimentales previas, se propuso una metodología de medición in situ integrada por tres partes: la caracterización del módulo experimental y la plataforma tecnológica; los procedimientos para las mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo; y los procedimientos para el cálculo del aislamiento acústico y sus valores globales. La metodología se aplicó a casos de estudio permitiendo la retroalimentación y validación de la misma. Esta fase experimental se abordó desde una perspectiva cuantitativa-positivista y una visión sistémica, interdisciplinaria y compleja porque se vincularon conocimientos de la arquitectura, agronomía, física y las tecnologías de la información y comunicación.

1. MÓDULO EXPERIMENTAL Y SU PLATAFORMA TECNOLÓGICA

Los ensayos in situ para determinar el aislamiento acústico de los materiales de un techo se realizaron en un módulo experimental, para lo cual fue necesario aumentar su hermeticidad aislando acústicamente los cerramientos y controlar las transmisiones indirectas del ruido exterior (Meza, 2007). Por otro lado, los ensayos acústicos que emplean el método global con altavoz requieren una plataforma tecnológica que funcione de manera integrada y que esté constituida por equipos de emisión y recepción sonora, los

equipos de computación y los software utilizados para la ecualización y el monitoreo de la señal acústica (Figura 1).



Figura 1. Instrumentación para las mediciones, ecualización y monitoreo de la señal acústica.

Fuente: Elaboración propia(2014).

Los equipos de emisión sonora están conformados por un generador de ruido rosa; un amplificador de banda ancha de operación disponible entre 20 Hz y 20 kHz (que permite aumentar los niveles de presión sonora exterior de manera que sean superiores al ruido de fondo presente en el lugar); un ecualizador paramétrico y un sistema de altavoces. Es importante mencionar que el oído en teoría puede escuchar frecuencias que van de 20hz hasta 20khz, tomando este rango, los altavoces deben alcanzar estas mismas frecuencias.

El método global con altavoces emplea un ruido rosa el cual se puede generar de forma digital por un software especializado, que se transmite al amplificador y desde allí al sistema de altavoces. Por otra parte, para ecualizar el ruido rosa se requiere conectar el

amplificador/ecualizador a un ordenador (PC1) y utilizar un software especializado para aumentar o disminuir el nivel de presión sonora en cada frecuencia, con el objeto de generar un espectro sonoro continuo (Figura 2).



Figura 2. Ecuación de la señal acústica.
Fuente: Elaboración propia (2014).

Los equipos de recepción sonora están constituidos por un calibrador de campo Clase 1 de alto rendimiento para comprobar la exactitud del sonómetro; un micrófono de patrón de captación omnidireccional de respuesta plana en el dominio de la frecuencia entre 20 Hz a 20 kHz; un sonómetro analizador Clase 1 con filtros de banda de 1/3 octava en tiempo real (RTA) que permite el trabajo de campo libre con precisión, y debe incluir además un módulo para medir el tiempo de reverberación; todos estos equipos deben cumplir con los estándares de la Norma IEC 61672 (Anguera, 2013). Para facilitar la visualización y el monitoreo de las mediciones, el sonómetro se conecta a un ordenador (PC2) y de esta forma, la señal que sale del amplificador y del sistema de altavoces es registrada y guardada en el sonómetro para su posterior análisis.

2. MEDICIONES IN SITU DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE TECHOS

Los ensayos de aislamiento acústico in situ se iniciaron calibrando el sonómetro, luego se ecualiza el sistema sonoro para generar un espectro continuo en el rango de frecuencias considerado. Si las mediciones se hacen en bandas de tercio de octava, se deben usar como mínimo las bandas de frecuencias centrales desde 100 Hz hasta 3150 Hz, y preferiblemente desde 50 Hz hasta 5000 Hz (ISO 140-5, 1998). Para asegurar que las observaciones dentro del local no estén afectadas por ruidos extraños procedentes del exterior, el nivel de potencia sonora de la fuente de ruido debe ser suficientemente alto como para que el nivel de presión sonora del local receptor exceda al ruido de fondo en 6 dB como mínimo, preferiblemente 10 dB (ISO 140-5, 1998). Para todos los parámetros acústicos se realizan repeticiones de medidas, se calculan sus niveles promedios y se determina el aislamiento de los materiales del techo utilizando las ecuaciones mostradas en la Figura 3.

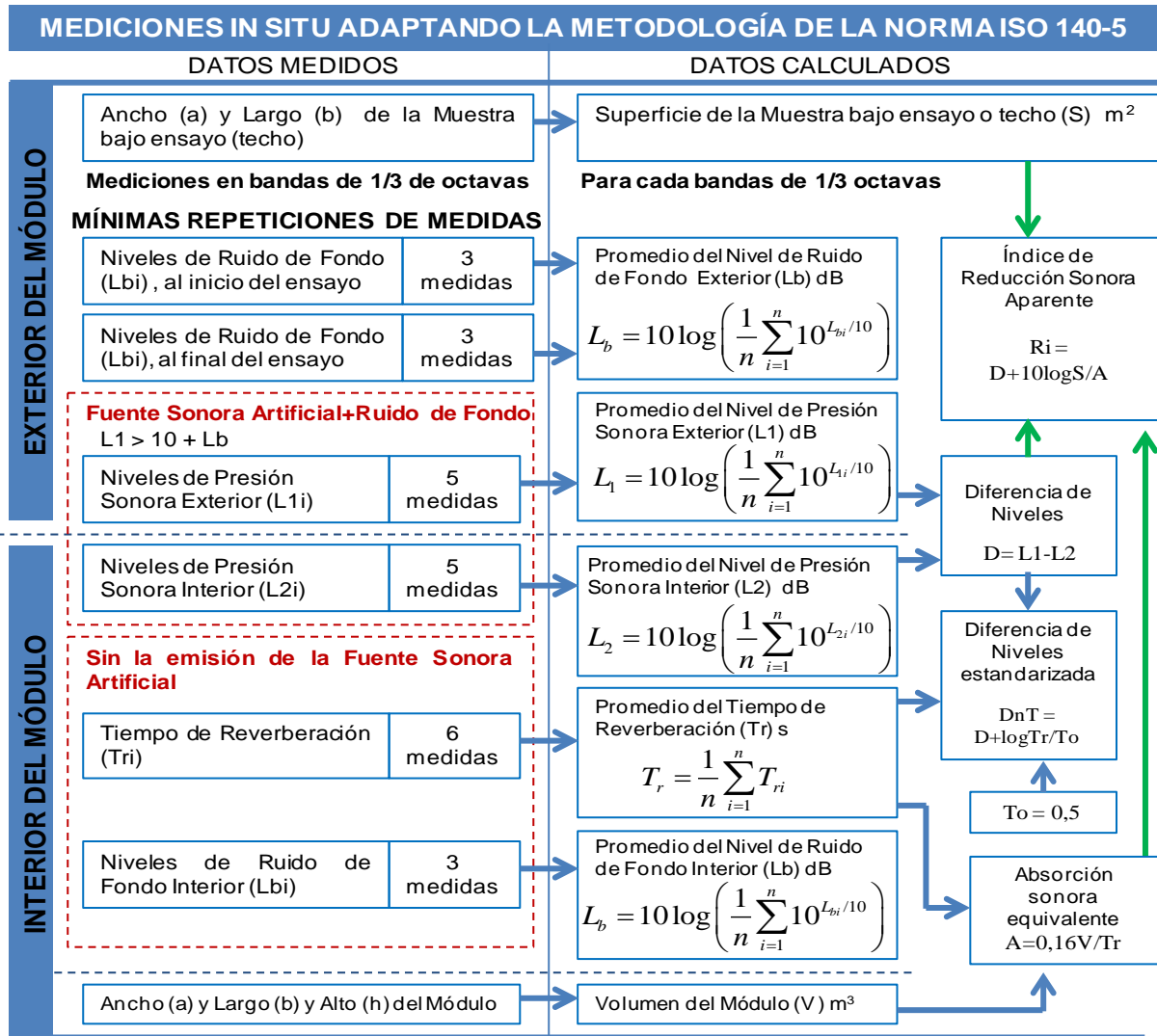


Figura 3. Modelo para determinar el índice de reducción sonora aparente a partir de mediciones in situ. Fuente: Elaboración propia (2014).

2.1. Mediciones en el exterior del módulo experimental

En el exterior del módulo experimental se realizaron las campañas de medidas de los niveles de ruido de fondo exterior y los niveles de presión sonora exterior (combinación del

ruido de fondo mas el generado por una fuente sonora artificial). Para los ensayos in situ, las normas recomiendan las posiciones de los altavoces y del sonómetro (Figura 4).

MEDICIONES EN EL EXTERIOR DEL MÓDULO EXPERIMENTAL EN BANDAS DE 1/3 DE OCTAVAS

Equipos y sus posiciones



Calibración acústica del sonómetro

Sonómetro ubicado en el centro del Techo a una altura de 2 m

Altavoces ubicados a una distancia d al Techo de 5 m, r desde la fuente sonora al centro de la muestra de 7 m y un ángulo de incidencia sonora de $(45 \pm 5)^\circ$



Parámetros acústicos

Nivel de Ruido de Fondo

Tres mediciones del **Nivel de Ruido de Fondo Exterior** (L_b), al inicio del ensayo

Sonido emitido por una Fuente Artificial (Altavoces)

Medición del **Nivel de Presión Sonora Exterior** (L_1)

no
 $L_1 > L_b + 10$

Se incrementa L_1 con un amplificador sonoro

si

Ecualización de la señal sonora



5 mediciones mínimas del **Nivel de Presión Sonora Exterior** (L_1)

Nivel de Ruido de Fondo

Mediciones dentro del Módulo Experimental

Tres mediciones del **Nivel de Ruido de Fondo Exterior** (L_b), al finalizar el ensayo

Figura 4. Mediciones en el exterior del módulo experimental. Fuente: Elaboración propia (2014).

2.1.1. Posición de los altavoces y del sonómetro

En el aislamiento acústico a ruido aéreo utilizando el método global con altavoz, la norma ISO 140-5 establece las posiciones de los altavoces, recomendando una distancia r desde la fuente sonora hasta el centro de la muestra como mínimo 7 m y una distancia d a la fachada (en este caso una distancia al techo) de 5 m como mínimo, de modo que minimice las variaciones del nivel de presión sonora sobre la muestra en ensayo. Así mismo, los

altavoces deben orientarse con un ángulo de incidencia de $(45 \pm 5^\circ)$, este ángulo se forma entre el eje del altavoz dirigido al centro de la muestra de ensayo y la normal de la superficie del techo. Por otro lado, para tomar las medidas en campo libre, el sonómetro debe ubicarse a 2 m frente a la fachada (ISO 140-5:1998), adaptando la norma se debe colocar en el centro del techo a una altura de 2 m (Tabla 1).

Tabla 1. Instrumento de recopilación de datos, mediciones en el exterior del módulo

| MEDICIONES IN SITU EN EL EXTERIOR DEL MÓDULO EXPERIMENTAL | | | | | |
|--|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Prototipo de Techo N°: | | | | | |
| Configuración del Prototipo de Techo y ensayos a realizar | | | | | |
| | | | | | |
| Calibración acústica del sonómetro (desviación en dB): | | | | | |
| Ensayo N°: | | | Fecha: | | |
| Nivel de Ruido de Fondo Exterior (Lb) | | | | | |
| Al inicio del ensayo | | | Al finalizar el ensayo | | |
| Hora de Inicio: | | | Hora de Inicio: | | |
| Número de la Medida | Nombre del archivo | Nivel de Presión sonora Leq | Número de la Medida | Nombre del archivo | Nivel de Presión sonora Leq |
| 1 | | | 1 | | |
| 2 | | | 2 | | |
| 3 | | | 3 | | |
| Hora de finalización: | | | Hora de finalización: | | |
| L1 > Lb+10 | | | | | |
| Nombre del archivo Señal acústica ecualizada: | | | | | |
| Hora de Inicio: | | | Hora de finalización: | | |
| Medidas del Nivel de Presión Sonora Exterior (L1) | | | | | |
| Hora de Inicio: | | | | | |
| Número de la Medida | Nombre del archivo | Nivel de Presión sonora Leq | Número de la Medida | Nombre del archivo | Nivel de Presión sonora Leq |
| 1 | | | 4 | | |
| 2 | | | 5 | | |
| 3 | | | 6 | | |
| Hora de finalización: | | | | | |
| OBSERVACIONES | | | | | |

Fuente: Elaboración propia (2014)

2.1.2. Medición del ruido de fondo y los niveles de la presión sonora exterior

Para obtener el nivel de ruido de fondo exterior medio (L_b) se recomiendan seis mediciones: tres al inicio del ensayo y tres al final, con una duración de 3 minutos cada una. Por otro lado, para medir los niveles de presión sonora exterior (L_1) primero se verifica que los altavoces estén emitiendo un nivel de presión 10 dB superior al nivel de ruido de fondo. Luego se ecualiza la señal sonora y se emite a través de los altavoces. Para obtener el nivel de presión sonora exterior medio (L_1) se recomienda tomar como mínimo 5 medidas (Tabla 1).

2.2. Mediciones en el interior del módulo experimental o local de recepción

En el interior del módulo experimental se realizaron las campañas de medidas de los niveles de presión sonora interior (combinación del ruido de fondo mas el generado por una fuente sonora artificial ubicada en el exterior del módulo), el tiempo de reverberación y los niveles del ruido de fondo interior.

El campo sonoro en el interior de un recinto varía entre un punto y otro debido a su forma geométrica, a la reflexión y absorción que se produce en las paredes, techo y elementos que se encuentran en el interior del local. Debido a esto, es necesario realizar un muestreo del nivel sonoro en el espacio mediante diferentes posiciones de micrófono (Meza, 2007). Los nivel de de presión sonora interior se pueden medir utilizando un solo micrófono o una red de micrófonos, en el primer caso este se sitúa en las posiciones recomendadas, como mínimo en cinco para obtener el nivel de presión sonora interior medio (L_2) (ISO 140-5,1998; Meza, 2007), estas posiciones deben distribuirse uniformemente considerando el

espacio disponible del local, la duración para tomar cada medida puede ser de 10 segundos o hasta que se estabilice la señal sonora. Las distancias mínimas que deben mantener los micrófonos son: entre posiciones del micrófono 0,7 m, entre cualquier posición de micrófono y las superficies límites del módulo 0,5 m (ISO 140-5,1998) y 1,0 m entre cualquier posición del micrófono y la fuente acústica (Meza, 2007), el micrófono debe situarse a una altura de 1,5 m.

Por otro lado, Para obtener el tiempo de reverberación medio (T_r) se necesitan según la Norma ISO 140-5 (1998), seis medidas de caída del nivel sonoro como mínimo, en cada banda de frecuencias de un tercio de octavas; se debe usar tres posiciones del sonómetro como mínimo, con dos lecturas en cada caso. Por último, los niveles de ruido de fondo interior medio (L_b) se obtienen a través de tres mediciones en distintas posiciones, con una duración de 3 minutos cada una, promediándose estos niveles energéticamente.

3. PROCEDIMIENTOS PARA EL CÁLCULO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO Y SUS VALORES GLOBALES

Luego de las repeticiones de medida, se calculan los promedios de los parámetros: ruido de fondo (L_b), el nivel de presión sonora exterior (L_1) y de presión interior (L_2) a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3). Donde n es el número de mediciones realizadas, L_{bi} (dB) los niveles de ruido de fondo desde L_{b1} hasta L_{bn} . L_{1i} (dB) los niveles de presión sonora exterior desde L_{1_1} hasta L_{1n} . L_{2i} (dB) son los niveles de presión sonora medidos en el interior del módulo desde L_{2_1} hasta L_{2n} .

$$L_b = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{bi}/10} \right) \quad (1) \quad L_1 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{1i}/10} \right) \quad (2) \quad L_2 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{2i}/10} \right) \quad (3)$$

El tiempo de reverberación promedio (T_r) se calculó de acuerdo a la ecuación (4), donde T_{ri} (dB) son los tiempos de reverberación medidos desde T_{r1} hasta T_{rn} y el tiempo de reverberación de referencia es $T_0 = 0,5$ s. Cuando se usa una fuente sonora artificial la diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}) y el índice de reducción sonora aparente (R_i) por bandas de frecuencia de un 1/3 de octava, se calculan según las ecuaciones (5) y (6).

$$T_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ri} \quad (4) \quad D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{T_r}{T_0} \right) \quad (5) \quad R_i = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 1,5 \quad (6)$$

Donde L_1-L_2 es el aislamiento bruto (D), S es el área del techo bajo ensayo y A es el área de absorción sonora equivalente del local de recepción. El índice de reducción sonora aparente (R_i) corresponde a la medida del aislamiento a ruido aéreo del techo, donde A se calcula de acuerdo a la fórmula de Sabine, siendo V el volumen del local de recepción y T es el tiempo de reverberación (ISO 140-5, 1998):

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (7)$$

3.1. Magnitudes globales para la valoración del aislamiento a ruido aéreo

La necesidad de comparar el aislamiento acústico de distintas soluciones constructivas se dificulta debido a su dependencia frecuencial (Meza, 2007). El método de comparación descrito en la norma ISO 717-1 permite convertir el aislamiento acústico obtenido en bandas de frecuencias de tercio de octava en un solo valor o magnitud global (X_w) sea esta la diferencia de nivel estandarizada global (D_{nTw}) o el índice de reducción sonora

aparente global (R_{iw}). Estas magnitudes globales se calculan a partir de los valores de medida X_i (D_{nT} o R_i) y los valores de referencia (X_r) para el aislamiento a ruido aéreo en el rango de frecuencias 100 Hz a 3150 Hz (Tabla 2). Con estos valores se obtienen las curvas de medida y la curva de referencia, esta última se desplaza en saltos de 1 dB hacia las curvas de medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor a 32 dB (para mediciones en bandas de tercio de octava).

De esta manera, el número de saltos o desplazamientos va desde 1 hasta n y los valores desplazados (X_d) se obtienen de la diferencia del valor de referencia (X_r) y el total de desplazamientos (n). En D_{nT} las desviaciones desfavorables deben cumplir las siguientes condiciones: Si $X_d - D_{nT} < 0 \rightarrow 0$; Si $X_d - D_{nT} > 0 \rightarrow$ resultado. Estas condiciones también se aplican a R_i . El valor a 500 Hz en las curvas desplazadas es el valor global de D_{nTw} y R_{iw} .

Tabla 2. Cálculo de las magnitudes globales para la valoración del aislamiento a ruido aéreo

| Frecuencia Hz | X_i | | X_r | Número de desplazamientos (n) | | Número de desplazamientos (n) | |
|------------------|----------|-------|------------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|
| | D_{nT} | R_i | Valores de referencia ISO 717-1 | X_d en D_{nT} (Valores desplazados) | Desviaciones desfavorables en D_{nT} | X_d en R_i (Valores desplazados) | Desviaciones desfavorables en R_i |
| 100 | | | 33 | | | | |
| 125 | | | 36 | | | | |
| 160 | | | 39 | | | | |
| 200 | | | 42 | | | | |
| 250 | | | 45 | | | | |
| 315 | | | 48 | | | | |
| 400 | | | 51 | | | | |
| 500 | | | 52 | D_{nTw} | | R_{iw} | |
| 630 | | | 53 | | | | |
| 800 | | | 54 | | | | |
| 1000 | | | 55 | | | | |
| 1250 | | | 56 | | | | |
| 1600 | | | 56 | | | | |
| 2000 | | | 56 | | | | |
| 2500 | | | 56 | | | | |
| 3150 | | | 56 | | | | |
| SUMATORIA: | | | | | $\Sigma < 32dB$ | SUMATORIA: | $\Sigma < 32dB$ |

Fuente: Elaboración propia (2014)

3.1.1. Término de adaptación al espectro

El término de adaptación espectral es el valor, en decibelios, que se añade al valor de la magnitud global (X_w) para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular: C cuando se calcula con el Espectro N° 1 (ruido rosa) y C_{tr} cuando se calcula con el Espectro N° 2 (ruido de tráfico urbano), ambos espectros son ponderados A y el nivel global normalizado a 0 dB. El término de adaptación espectral C se calcula según la norma ISO 717-1 mediante la ecuación (8), donde X_w es el valor de la diferencia de nivel estandarizada global (D_{nTw}) o el índice de reducción sonora aparente global (R_{iw}). X_{Ai} se calcula según la ecuación (9), donde i es el índice para las bandas de 100Hz a 3150Hz, L_i son los niveles sonoros a la frecuencia i para el Espectro N°1 (Tabla 3), X_i es la diferencia estandarizada de nivel sonoro (D_{nT}) o el índice de reducción sonora aparente (R_i), a la frecuencia de medida i dada con una precisión de 0,1dB y redondeado al valor entero más próximo.

$$C = X_{Ai} - X_w \quad (8) \quad X_{Ai} = -10 \lg \sum 10(L_i - X_i)/10 \quad (9)$$

Tabla 3. Espectro de nivel sonoro para calcular término de adaptación C del aislamiento a ruido aéreo

| Frecuencia (Hz) | L_i Espectro N°1 | Frecuencia (Hz) | L_i Espectro N°1 |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 100 | -29 | 630 | -12 |
| 125 | -26 | 800 | -11 |
| 160 | -23 | 1000 | -10 |
| 200 | -21 | 1250 | -9 |
| 250 | -19 | 1600 | -9 |
| 315 | -17 | 2000 | -9 |
| 400 | -15 | 2500 | -9 |
| 500 | -13 | 3150 | -9 |

Fuente: ISO 717-1 (1996)

Las magnitudes globales D_{nTw} y R_{iw} , cuando se usa ruido rosa como fuente sonora deben expresarse con el término de adaptación espectral C entre paréntesis.

4. METODOLOGÍA DE MEDICIONES IN SITU PARA EL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE TECHOS APLICADA A CASOS DE ESTUDIO

La metodología descrita para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de techos bajo ensayo in situ, se aplicó a tres casos de estudio (Figura 5) lo cual permitió retroalimentarla y validarla.

4.1. Módulo experimental para ensayos de aislamiento acústico in situ de techos

Se diseñaron y construyeron tres prototipos de techos con materiales ecológicos sobre un módulo experimental ubicado en el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia, en la ciudad de Maracaibo – Venezuela, adyacente a una calle con un alto ruido de tráfico vehicular e inmediaciones con alto ruido de equipos de aire acondicionado (Figura 6).

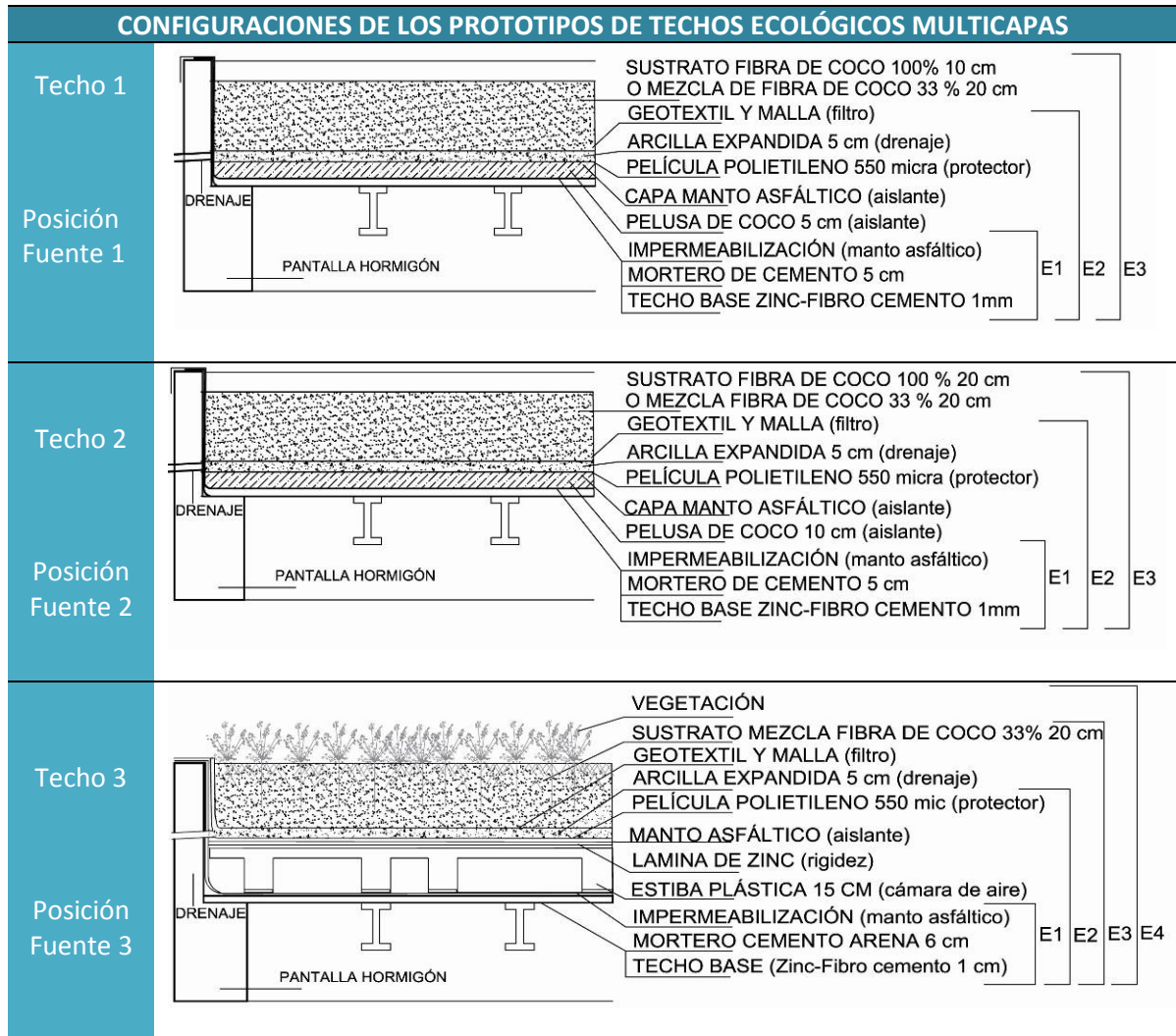


Figura 5. Diseños de prototipos de techos ecológicos multicapas.
 Fuente: Elaboración propia (2014)

Para realizar el ensayo in situ se aislaron acústicamente las paredes, puertas y ventanas del módulo cuyas dimensiones son: 2,77 m x 2,76 m, una altura de 2,50 m. El volumen del módulo es 19,11 m³ y el área de techo en ensayo es de 10,5 m² (Figura 7).

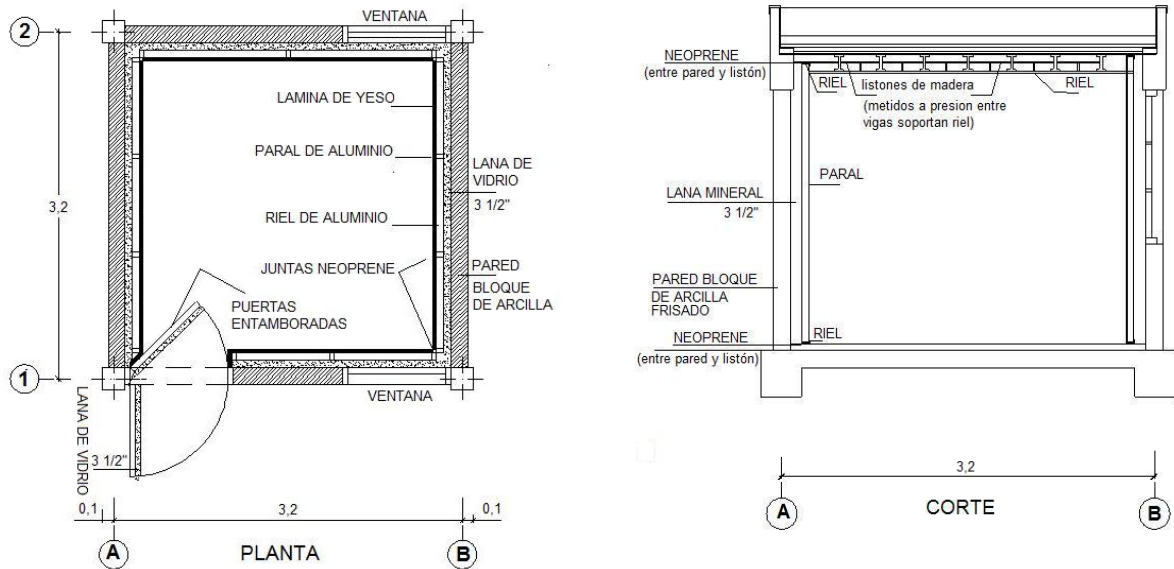


Figura 7. Esquema del aislamiento acústico del módulo experimental.
 Fuente: Elaboración propia (2014)

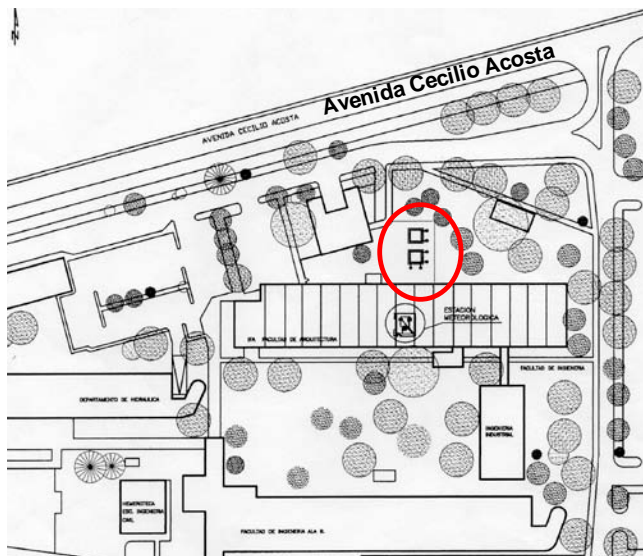


Figura 6. Ubicación del módulo experimental.
 Fuente: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (1996)

4.2. Plataforma tecnológica para ensayos de aislamiento acústico in situ de techos

En esta investigación se conformó una plataforma tecnológica integrada por equipos de emisión y recepción sonora que trabajan de forma integrada. Para la emisión sonora se utilizó un amplificador de banda ancha de operación disponible entre 20 Hz y 20 kHz, con sistema integrado de generador de ruido rosa y ecualizador paramétrico. La señal ecualizada se emitió a través de un sistema de altavoces, compuesto por un altavoz subwoofer de 15" para la emisión de ondas sonoras de bajas frecuencias y un altavoz subwoofer de 12" con su driver de radiación directa para la emisión de ondas de medias y altas frecuencias.

Como equipos de recepción sonora se utilizaron: un calibrador de campo de nivel sonoro Clase 1; un micrófono de patrón de captación omnidireccional de respuesta plana en el dominio de la frecuencia entre 20 Hz a 20 kHz; y un sonómetro analizador Clase 1 en tiempo real (RTA), todos cumplen con los estándares de la IEC 61672. El amplificador y sonómetro se conectaron a computadores para facilitar el proceso de monitoreo, ecualización y procesamiento de los datos (Figura 8).



Figura 8. Monitoreo de las mediciones in situ.
Fuente: Elaboración propia (2014)

4.3. Mediciones en el exterior del módulo experimental

Se tomaron como casos de estudio el techo base de los tres prototipos (Figura 9) antes mencionados, realizando tres experimentos variando la posición de la fuente sonora para detectar cual es la más idónea según el tipo de muestra (Figura 10). En la primera posición se ubicó la fuente sonora a una distancia d de 8,5 m y una distancia r desde la fuente al centro de la muestra de 12 m. En la segunda posición la fuente sonora estuvo a una distancia d de 5 m y una distancia r al centro de la muestra de 7 m. En la tercera posición se ubicó a una distancia d de 2,60 m y una distancia r al centro de la muestra de 3,68 m, variando la posición establecida por la norma ISO 140-5. El ángulo de incidencia sonora de las tres posiciones de los altavoces fue de 45° .

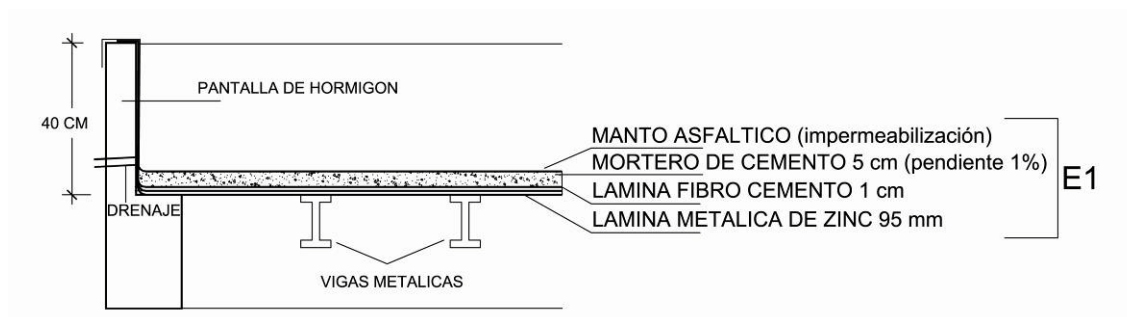


Figura 9. Configuración de Techo base.
Fuente: Elaboración propia (2014)

El sonómetro se calibró antes de cada ensayo ubicándose a 2 m sobre el centro del techo para las posiciones 1 y 2 y a 1,5 m para la posición 3 debido al acercamiento del altavoz a la muestra de ensayo. Para cada experimento la señal sonora fue ecualizada y se tomaron

18 medidas del nivel de presión sonora exterior (L_1) y 6 medidas del nivel de ruido de fondo (L_b), en bandas de frecuencia central de tercio de octava.

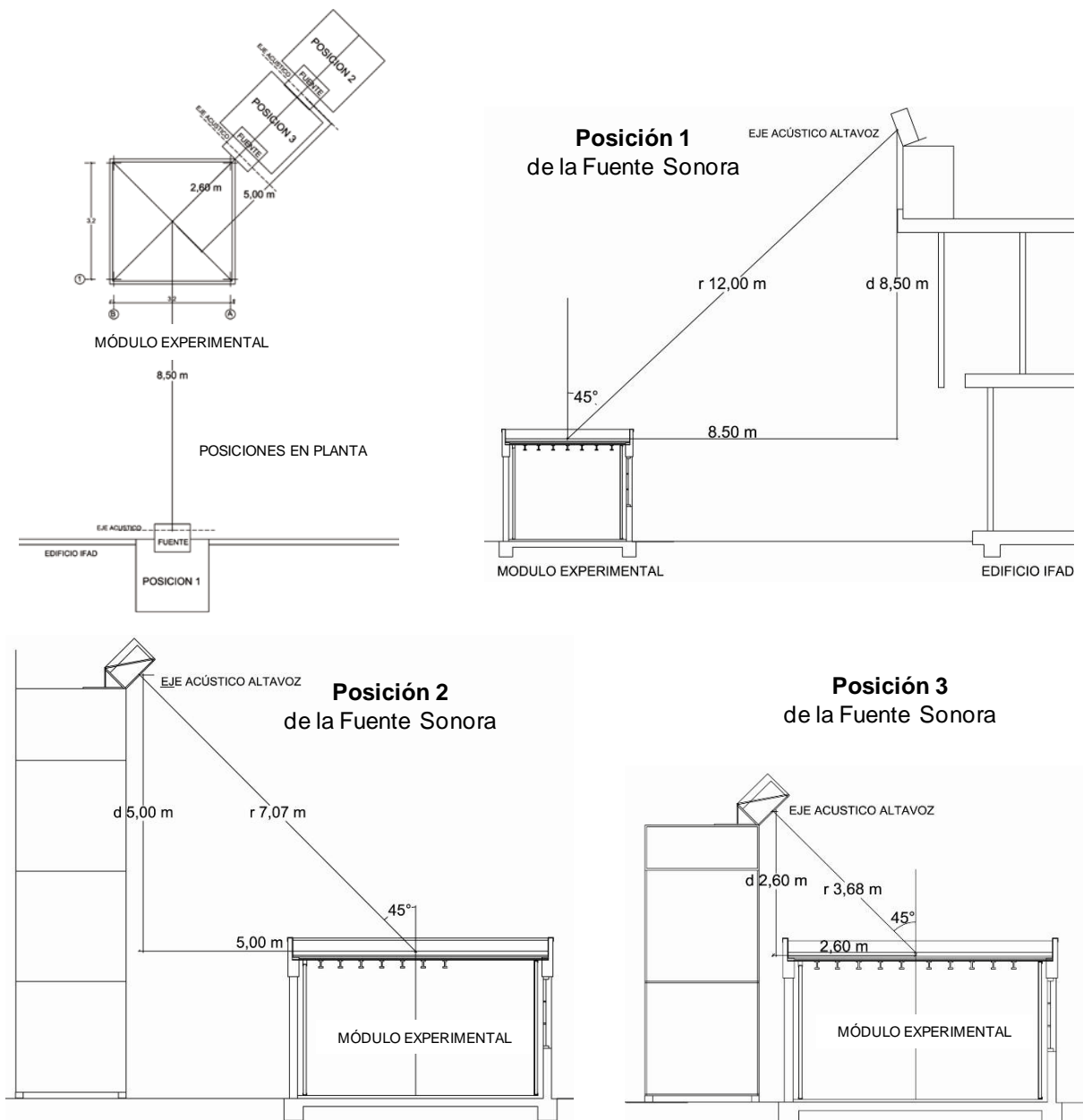


Figura 10. Posiciones de Fuente Sonora. Fuente: Elaboración propia (2014)

4.4. Mediciones en el interior del módulo experimental

En lugar de las cinco mediciones indicadas por la norma como mínimo, se realizaron en promedio entre 10 y 18 medidas con el objetivo de mejorar la calidad de la caracterización del nivel sonoro (Figura 10). En este sentido, los niveles de presión sonora interior (L_2) se midieron tomando 10 medidas en las configuraciones de techo 1 y 2: 5 medidas fueron a una altura de 1,50 m y 5 a una altura de 2 m respecto al piso. Con la configuración del techo 3 se tomaron 18 medidas: 9 medidas a una altura de 1,50 m y 9 a una altura de 2 m respecto al piso, en diferentes posiciones según la norma ISO 140-5. La duración de cada medida fue de 10 segundos o hasta que se estabilizara la señal sonora.

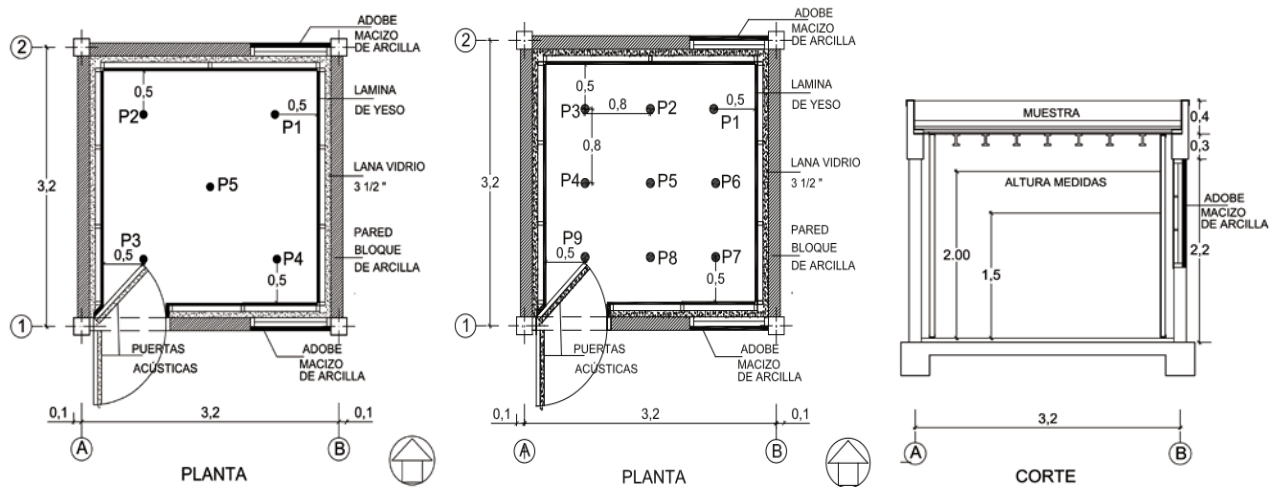


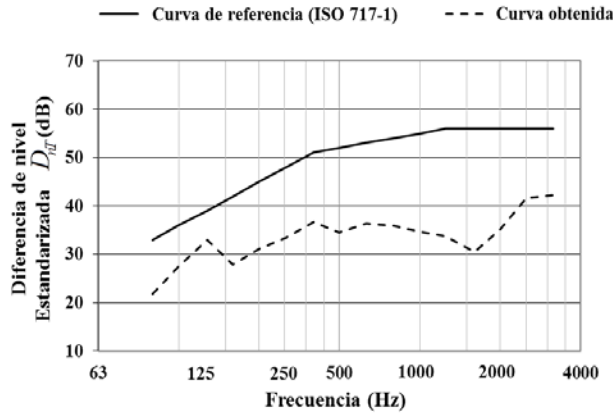
Figura 11. Posiciones micrófono para L_2 , L_b y T_r . Fuente: Elaboración propia (2014)

Por otro lado, se midieron los niveles de ruido de fondo en el interior del módulo tomando 3 medidas en diferentes posiciones a una altura de 1,50 m, con una duración de 3 minutos cada una. El tiempo de reverberación se obtuvo por el método de fuente impulsiva

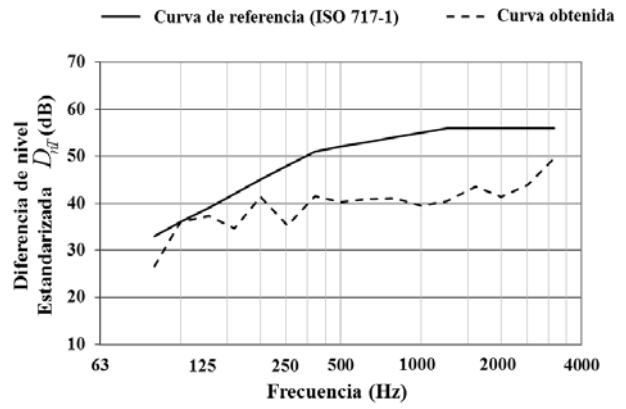
generado por la explosión de globos, se tomaron 6 medidas dentro del módulo experimental en 3 posiciones con 2 lecturas cada una (Figura 11).

4.5. Resultados y discusión de resultados de los ensayos de aislamiento acústico

En los ensayos de aislamiento acústico in situ, se calculó la diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}), el índice de reducción sonora aparente (R_i) y sus valores globales (D_{nTW}) y (R_{iW}) por bandas de frecuencia central de tercio de octava. Así mismo, se calculó el término de adaptación del espectro (C). Los resultados de medición se hicieron en las condiciones de campo difuso y se presentan sin corrección de ruido de fondo porque el nivel de potencia sonora de la señal ecualizada excedió al nivel de ruido de fondo en más de 10 dB. Los resultados de los experimentos variando la posición de la fuente sonora, tomando como muestra el techo base fueron las siguientes: para el prototipo de techo 1 y con posición de fuente 1 (r 12 m y d 8,5 m) aisló 37 dB, para el prototipo de techo 2 con posición de fuente 2 (r 7 y d 5 m) aisló 43 dB, para el prototipo de techo 3 con posición de fuente 3 (r 3,68 y d 2,60) aisló 43 dB (Figura 12 y Figura 13).

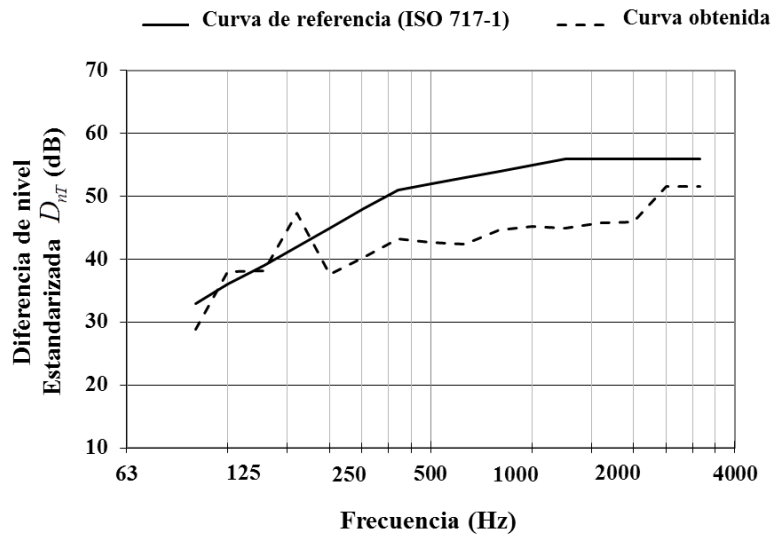


Ensayo: Techo Base del Prototipo de Techo 1
 $D_{nTW} = 36 (-2)$ y $R_{iW} = 37 (-2)$



Ensayo: Techo Base del Prototipo de Techo 2
 $D_{nTW} = 42 (-1)$ y $R_{iW} = 43 (-1)$

Figura 12. Aislamiento acústico de los Prototipos de Techos 1 y 2. Fuente: Elaboración propia (2014)



Ensayo: Techo Base del Prototipo de Techo 3
 $D_{nTW} = 45 (-0)$ y $R_{iW} = 43 (-0)$

Figura 13. Aislamiento acústico de los Prototipos de Techos 3. Fuente: Elaboración propia (2014)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aislamiento acústico de los techos ha sido un aspecto poco estudiado, por este motivo en este trabajo se elaboró una propuesta teórico metodológica para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de techos, bajo condiciones reales in situ utilizando el método global con altavoces, para este fin se adaptó la Norma ISO 140-5 para fachadas y la Norma ISO 717-1. La metodología descrita integra parámetros y procedimientos para hacer más efectiva la obtención, registro y análisis de la información.

Así mismo, se diseñaron y construyeron tres prototipos de techos ecológicos multicapas; la aplicación de la propuesta metodológica a estos casos de estudio permitió retroalimentarla y validarla. Se realizaron estudios experimentales con los techos base de estos tres prototipos los cuales presentan los mismos materiales pero diferentes posiciones de la fuente sonora. Con las mediciones in situ se obtuvieron curvas de aislamiento de los prototipos de techos 1, 2 y 3 las cuales se compararon con la curva de referencia de la Norma ISO 717-1, determinándose un aislamiento acústico de 37, 43 y 43 dB respectivamente. La diferencia en los resultados se debió a la posición de la fuente sonora, la Norma ISO 140-5 recomienda que esté ubicada con respecto al centro de la muestra de ensayo a una distancia r igual o mayor a 7 m.

En el estudio realizado se comprueba que para el tipo de techo experimentado ubicando la fuente sonora a una distancia r mayor a 7 metros (posición 1), se dispersaron las ondas sonoras en el campo libre, obteniendo 6 dB menos que las posiciones de fuente sonora 2 y 3. De los resultados de la experimentación para una muestra pequeña, se recomienda

ubicar la fuente a una distancia r menor o igual a 7 m (posición 2 y 3) para que la energía sonora se enfoque directamente a la muestra y se minimice la transmisión de las ondas hacia otras superficies.

Debido a los altos costo de los materiales acústicos y la importancia de usar materiales ecológicos de procedencia local en los techos, la investigación plantea retos desde el punto de vista económico y ambiental, contribuyendo con una metodología que permite cuantificar el aislamiento acústico de los materiales y proteger las edificaciones de la contaminación acústica siendo éste uno de los aspectos para mejorar la calidad de vida en nuestra sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anguera, Silvia (2013). IEC 61672: Normativa para sonómetros. Fecha de consulta: 22/09/2014. <http://www.cirrusresearch.es/iec-61672-normativa-para-sonometros-que-consta-de-tres-partes/>

Arau, Higini (1999). ABC de la Acústica Arquitectónica. Ediciones CEAC. España.

AFNOR (1982). Norme NF S 31-057 Vérification de la qualité acoustique des bâtiments. Association Francaise de Normalisation. Francia

ASTM International (1987). ASTM E336-97 Standard Test Method for Measurement of Airborne Sound Insulation in Buildings. American Society for Testing and Materials. USA

ASTM International (2004). ASTM E966-04 Standard Guide for Field Measurement of Airborne Sound Insulation of Building Facades and Facade Elements. American Society for Testing and Materials. USA

Bies, David y Hansen, Colin (2009). Engineering Noise Control. Theory and practice. Fourth Edition. Spon press. USA.

Frutos Borja y Olaya Manuel (2007). Acústica en la edificación. Mediciones acústicas: La verificación del confort acústico y el control del ruido en los espacios habitados. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC. Madrid

Covenin N° 1433 (1981). Norma Venezolana: Determinación del ruido emitido por vehículos de motor. República de Venezuela.

Covenin N° 1565 (1995). Norma Venezolana: Ruido Ocupacional, Programa de conservación auditiva. Niveles permisibles y criterios de Evaluación 3era revisión. República de Venezuela.

Decreto N° 2217 (1992). Normas sobre el control de la contaminación generada por ruido, Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 4.418, 1992.

García, Benjamín y Garrido, Francisco (2003). La Contaminación Acústica en nuestras ciudades. Fundación la Caixa. Barcelona.

ISO 140-3 (1995). Norma Internacional: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción Parte 3: mediciones en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de construcción.

ISO 717-1 (1996). Norma Internacional: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

ISO 140-5 (1998). Norma Internacional: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de edificios Parte 5: mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas.

López Miguel (2008). Ruido rosa. <http://miguellopezdelpino.blogspot.com/2008/02/ruido-rosa-se-denomina-ruido-rosa-una.html>. Consultada el 28 de octubre de 2014

Meza, Leonardo (2007). Nueva valoración del aislamiento acústico de viviendas asociado al clima mediterráneo: aislamiento acústico/térmico. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Recuero, Manuel (1999). Acústica Arquitectónica Aplicada. Editorial Paraninfo, Madrid.

Van Renterghem, T. y Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical facade load from road traffic with Green roofs. *Building and Environment* , 44, 1081-1087.