



MEDICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO EN CONDICIONES COMPARABLES DE LABORATORIO DE VENTANAS DE DISEÑO TRADICIONAL Y VENTANAS DE ESTRUCTURA METAMATERIAL

Dulce Rosario Ponce Patrón^a, Felipe Orduña Bustamante^b, Guillermo Quintero Pérez^b, Santiago Jesús Pérez Ruiz^b, Ricardo Dorantes Escamilla^b, Antonio Bautista Kuri^a, Antonio Pérez López^b.

^a Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

^b Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de México.

RESUMEN

Las fachadas de los edificios tienen la función de controlar los factores ambientales externos; entre ellos el ruido. Su composición formal debiera presentar una respuesta tecnológica ante las diversas condiciones de su entorno, como el desempeño óptimo de reducción acústica; que corresponda con el uso del edificio y el nivel sonoro al que están expuestas. Es común que, en el diseño de las soluciones acústicas, la fachada se asuma 'sellada' debido a dichos requerimientos; sin embargo, no siempre es así ya en funcionamiento. En los edificios de vivienda vertical en la Ciudad de México las fachadas utilizan cerramientos de ventana; y es común el uso de ventilación natural, y que sus dimensiones respondan a necesidades higiénicas de iluminación y ventilación.

Este estudio considera las implicaciones que presenta proyectar un vano con ventilación de diseño tradicional, en el confort acústico de una edificación de vivienda vertical. Posteriormente, explora otras opciones de protección pasiva que permiten la ventilación y reducción acústica mejorada con base en los metamateriales. Finalmente, en laboratorio mediante la norma ISO 10140 se analiza y se compara la protección que ofrecen las diferentes tipologías de materiales en cerramiento y el área de ventilación: ventana pivotante de aluminio y vidrio (abierta y sellada), ventana con estructura de metamaterial.

ABSTRACT

In Mexico City, urban mobility produces noise pollution, which affects the inhabitants. Building facades can help in controlling external environmental factors, including noise. Their formal composition must present an adequate technological response to the environment, particularly an optimal performance of acoustic reduction, in correspondence with the intended use of the building and the

sound level to which it will be exposed. It is common that, in acoustic solutions, the facade is assumed to be 'sealed' in compliance with such requirements. However, this is not always the case in operation. In vertical housing buildings in Mexico City, the window enclosure span is used as a design parameter, with dimensions responding to the minimum hygienic needs of illumination and ventilation. This study considers the implications of designing a traditional ventilated opening for the acoustic comfort of a vertical housing building. Subsequently, other passive protection options that allow ventilation and improved acoustic reduction based on metamaterials are explored. Finally, the protection offered by different types of enclosure materials and the ventilation area that they offer are analyzed and compared: pivoting window with aluminum frame and glass (open and sealed) and a metamaterial based window 1.

Palabras Clave— aislamiento acústico, ventilación natural, metamaterial

1. INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México la movilidad urbana produce contaminación acústica que pone en riesgo la salud y calidad de vida de los habitantes. El resultado de estas condiciones son entornos urbanos poco favorables con elevados niveles sonoros, del tal modo que es de suma importancia incorporar en las fachadas expuestas (a esos ruidos que se transmiten por vía aérea), sistemas que controlen la transmisión de energía acústica y se alcancen los objetivos de calidad acústica adecuados al interior de los edificios. No siempre es posible para los diseñadores modificar el nivel sonoro al exterior del edificio, pero sí pueden controlar la inmisión y obtener un nivel sonoro idóneo en los espacios habitables, eligiendo soluciones de diseño y tecnológicas, activas o pasivas, con adecuadas propiedades de reducción acústica [1].

En la actualidad, los altos consumos y costos energéticos han demandado envolventes que reduzcan la demanda de calefacción o enfriamiento y entre otras estrategias, el uso de la ventilación natural [2][3][4] es deseable y habitual en las construcciones de la Ciudad de México; incluso se considera de manera obligatoria en normativas de construcción y vivienda [5][6]. Un local debe estar iluminado por un área de ventana igual o superior a 17.5% del área del local, y el 5% destinado para ventilación.

Sin embargo, en el diseño de fachadas de los edificios o particiones interiores, rara vez se considera el control acústico. Por ejemplo, el Código de edificación de vivienda [6] de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) considera que se deben generar las condiciones para que “el conjunto de los elementos constructivos... permitan cumplir los tiempos máximos de exposición por nivel de presión sonora” y establece el peso mínimo de la envolvente será de 250 kg/m² o el Reglamento de construcción [5] que establece que la reducción acústica de la envolvente debe ser igual o mayor a 30 dB. En el primer caso, lo establecido funciona como una sugerencia y en el segundo caso, aunque es parte de los requisitos para un permiso de construcción, en la práctica no es obligatoria.

Es necesario considerar, además, que las edificaciones que priorizan la ventilación natural disminuirán significativamente la reducción sonora de una partición [7][8]. Una estrategia adecuada para el aislamiento acústico inicialmente sugiere el uso de muros de espesor considerable, la combinación de sistemas constructivos con varias capas de materiales o la implementación de materiales y sistemas aislantes acústicamente. No obstante, habrá que considerar que los requerimientos higienistas de ventilación e iluminación usualmente conllevan el uso de aperturas en la fachada y cuando ésta cuenta con elementos de vanos como ventanas o puertas, éstas debilitan la ‘protección’ sonora que ofrece el sistema. Es común que en las soluciones acústicas la fachada aún con ventanas o puertas se asuma ‘sellada’ [8], sin embargo, no siempre es así ya en funcionamiento, como en el caso de la Ciudad de México.

De acuerdo con lo antes expuesto, es pertinente evaluar otras alternativas en el diseño de sistemas de envolventes que permitan de manera pasiva la inmisión del viento y a su vez controlen la inmisión sonora. El objetivo de esta comunicación es determinar el tipo de ventana que presenta la mayor eficiencia en relación con la reducción acústica y el área de ventilación ofrecida. Para ello se seleccionaron dos ventanas (ventana pivotante de aluminio y vidrio, y otra a base de estructura de metamaterial) y mediante pruebas de laboratorio siguiendo la norma ISO 10140 [10][11] se calcularon sus índices de reducción acústica (Rw). Posteriormente se compararon los valores de Rw obtenidos y los valores de área de ventilación ofrecida para cada caso.

2. AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE FACHADAS

El papel de la fachada es reducir la transmisión de sonido hacia el recinto interior, para garantizar que el nivel de inmisión del ruido sea adecuado y los habitantes desarrollen sus actividades satisfactoriamente. Habrá que tener en cuenta que el aislamiento acústico es un enfoque de sistema, es decir se deben considerar la acción conjunta de los elementos vanos, macizos y elementos de unión, para obtener un mejor acercamiento.

Si se busca una estrategia adecuada para el aislamiento acústico se considera el uso de elementos (muros, ventanas, puertas) que reduzcan la transmisión de la energía sonora; cuyo desempeño se mide en el sitio, mediante la diferencia de nivel normalizada de la fachada a 2 m ($D_{tr2,mn}$) y evaluada de acuerdo con las normas ISO 16283-3[12] e ISO 717-1[11], o conociendo el índice de reducción acústica (R o Rw) del material, medido en laboratorio para cada banda del espectro de frecuencias a partir de la norma ISO 10140 [10] u obtener un valor global (R_w) y términos de adaptación espectral C y Ctr, que condicionan el desempeño global de la partición ante ruido comunitario (C) o ruido por tráfico vehicular (Ctr), calculados a partir de la norma ISO 717-1[11] y se evalúa el rendimiento acústico de los edificios a partir de la norma ISO 12354-3:2017 [13].

El índice R mide el decremento normalizado del nivel sonoro debido a la presencia de un elemento constructivo que impide la libre transmisión del sonido y se determina mediante la expresión:

$$R_i = L_1 - L_2 + 10 \frac{S}{A} \quad \text{dB} \quad (1)$$

$$A = 0.16 * \frac{vr}{Tm} \quad \text{m}^2 \quad (2)$$

$$R_i = -10(10^{-R_i*0.1} - 10^{-R'F*0.1}) \quad \text{dB} \quad (3)$$

Donde: R_i es la diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencias i ; L_1 es el nivel de presión sonora medido en la cámara emisora; L_2 es el nivel de presión sonora medido en la cámara receptora; S es el área de la partición analizada.

A es el área de absorción equivalente en el cuarto receptor, y para su cálculo se toma el tiempo de reverberación promedio Tm y volumen (vr) en el cuarto receptor. Al colocarse un elemento de menor tamaño el valor R será comparado con un valor de referencia $R'F$ que corresponde al valor de R del muro y se aplica la expresión (3), si las diferencias son mayores a 6 dB se genera una corrección por flanqueo (transmisión por rutas alternas, estructurales, etc.).

También es necesario identificar el tipo de sonido que se va a reducir y sus características de intensidad acústica (dB) y espectro de frecuencias, por ejemplo, el espectro de frecuencias principal del ruido de tráfico vehicular se encuentra en el intervalo de 500 a 4000 Hz [18] y aunque de acuerdo con la intensidad del sonido y el valor global R_w una partición pudiera cumplir con los requerimientos, si se observa el espectro de frecuencias, usualmente las barreras comunes no son efectivas en bajas frecuencias como 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz “debido a la gran masa superficial requerida por la ley de densidad de masa” [14] para dichas frecuencias.

3. EL VANO DE LA FACHADA

Una abertura en la fachada representa una vulnerabilidad desde el punto de vista acústico. Constructivamente, si a un muro se le coloca una ventana, esta será el elemento vulnerable para la transmisión del ruido. Esto es debido a que en una ventana el 80% es vidrio de bajo espesor (poca masa por unidad de área), sujetado por un marco (aluminio, hierro, madera o PVC), usualmente ambos con valores bajos de reducción sonora (R). También es pertinente considerar que, en la colocación, un sello no adecuado propicia vacíos o aperturas cuyo índice de reducción sonora se considera nulo.

El desempeño acústico de un sistema de ventana dependerá de: el tipo de vidrio y espesor, tipo de marco y sello tanto en juntas como en el sistema de apertura de la ventana [12], es decir elementos de mayor solidez o masa presentarán mejores desempeños, así como el control de la transmisión a partir de elementos de sellado. En un sistema cerrado como un muro cortina o una ventana, el uso varias capas y cámara de aire [1] [14] [15] proveen mejores propiedades de aislamiento acústico que los vidrios sencillos. Sin embargo, la mayor condición que afecta su capacidad son los huecos en el sistema de cierre; las ventanas corredizas son las de menor desempeño y las ventanas con batiente (con sistemas de sello adecuado) permiten mayor estanqueidad y por lo tanto mejor desempeño acústico [16].

La dimensión del vano también influye en el desempeño, de acuerdo con Díaz [16] si las dimensiones de la ventana ensayada en laboratorio superan los 2.7 m² por cada 1 m² adicional, el valor global R_w de la ventana disminuirá 1 dB.

3.1. Vanos con ventilación natural

En edificaciones residenciales es deseable permitir el acceso de aire del exterior al interior de los recintos para que este renueve el aire del interior y lo renueve constantemente, con ello se satisfacen los requerimientos higienistas de renovación del aire y garantiza su calidad. Otro fin es la climatización enfocada en el enfriamiento (ya sea del

individuo, el recinto o la estructura del edificio) [15]; el intercambio de aire entre espacios por medio de vanos se origina porque el viento genera diferenciales de presiones y de temperatura (convección).

Para que estas condiciones se generen exitosamente es necesario que el recinto presente dos aberturas, una en presión positiva del viento (barlovento) y la otra en presión negativa (sotavento) y sus dimensiones están condicionadas por el flujo del viento y un factor de relación (fr). De acuerdo con ASHRAE [17] la tasa de ventilación se obtiene mediante la ecuación (4)

$$Q = C_v A_e v \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Donde: Q es la tasa de ventilación, A_e es el área libre del vano o abertura de acceso del viento (m²), v es la velocidad del viento (m/s) y C_v es la efectividad de acceso del viento proporcionada por el vano; el viento con incidencia perpendicular tiene mayor efectividad, presenta valores de incidencia 0.5 y 0.6, y el acceso en diagonal presenta valores de incidencia de 0.25 a 0.35.

Si se busca utilizar la ventilación natural como estrategia de enfriamiento, los edificios deberán privilegiar la orientación de la fachada hacia la zona de barlovento, y si la posición del terreno no lo permite, estas fachadas tenderán a requerir aberturas de mayor tamaño y sin obstrucciones. Ahora bien, en estos casos el incremento en el área de ventilación es proporcional a mayor circulación de aire fresco, sin embargo, al disminuir la estanqueidad, la capacidad de mitigación del ruido disminuye [17].

De acuerdo con Locher et al. [18] una ventana abierta muestra un desempeño de reducción acústica global (R_w) de entre 10 a 13 dBA, para ventanas inclinadas como pivotantes o abatibles se muestra un desempeño de reducción acústica global (R_w) de entre 14 y 19 dBA, a diferencia de ventanas cerradas que muestran desempeños de reducción acústica global (R_w) de entre 26 y 31 dBA,

Se han desarrollado diversas técnicas de control para la mitigación del ruido en protuberancias de la fachada para el control de la inmisión de la ventana ventilada y de otros elementos aplicados directamente a la ventana, estas técnicas se dividen en control activo y pasivo.

Las técnicas del control pasivo se basan en la absorción de la energía acústica por medio de materiales absorbentes o modificando los patrones de transmisión de la onda sonora; como fachadas dobles [7][18][19], el uso de elementos absorbentes que disminuyen la reflexión en salientes [20] [21], ventanas *plenum* simples [23] (con entrada de aire y salidas escalonadas) o con arreglos de tubos [22], elementos resonadores de membrana en ventanas [12][24]. Las técnicas

activas generan sonido de manera controlada por medio de fuentes sonoras secundarias para reducir los niveles de sonido de algunas frecuencias del espectro.

5.1.1. Estructura de metaventana

Cuando una onda pasa a través de una estructura periódica suceden efectos en ella [25] como modificación en la transmisión de la onda, módulos de masa con valor efectivo negativo, densidad de masa efectiva negativa [14], valores efectivos negativos de índice de refracción, entre otros.

Las estructuras periódicas, se pueden diseñar con propósitos y composiciones específicas para aprovechar estos efectos. En ingeniería son conocidas como estructuras de metamateriales y han demostrado potencial para la mitigación del ruido de baja frecuencia, aunque actualmente sus implicaciones prácticas son limitadas debido a la complejidad de diseño y de fabricación (Figura 1).

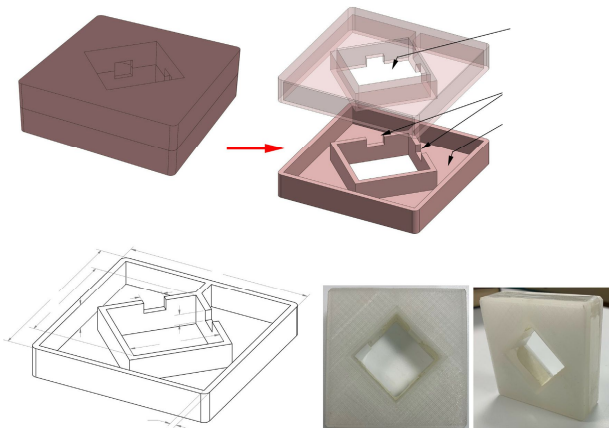


Figura 1. Configuración de celda de estructura de metamaterial fabricada con impresora 3D. Fuente: Kumar, Bang y Pueh (2019) [14].

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se realizaron en la cámara de transmisión (CT) del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) de la Universidad Nacional Autónoma de México, durante el periodo de febrero – mayo de 2023. Los equipos utilizados fueron: fuente omnidireccional y analizador B&K 2133, micrófonos de incidencia aleatoria B&K modelos 4943 y 4166, Boom giratorio B&K modelo 3923, calibrador 4230, termo higrómetro CT485R5 (White box). La cámara de transmisión del laboratorio tiene dos recintos: la cámara emisora (CE) (volumen 78.7 m³) y la cámara receptora (CR)

(volumen 67.7 m³), ambas fueron caracterizadas y adecuadas con el objetivo que los tiempos de reverberación (TR) cumplan con lo establecido en la norma ISO 10140-1[10].

Las propiedades de reducción acústica se midieron de acuerdo con las normas ISO 10140-2:2010 [09] [10] y las mediciones fueron evaluadas de acuerdo con la norma ISO 717-1 [11]. Entre las dos cámaras (CE y CR) se colocó un muro de block de concreto (M) de 10m² con aplanado de mortero en ambas caras, desacoplado de la estructura, procurando disminuir la transmisión por flancos de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 10140-2 [10]. Posteriormente, se determinó el nivel de presión sonora incidente promedio (L_1) y el nivel de presión sonora transmitida promedio (L_2) en 12 puntos de medición y dos posiciones de fuente; la temperatura osciló entre los 16° y 17° C y la humedad relativa entre el 61% y 63% en el periodo de medición.

Se calculó el área de absorción en CR a partir de la ecuación (3), después se calculó el indicador R a partir de la expresión (1) utilizando la superficie de la partición (S) de 10 m², los resultados se presentan en decibeles (dB) para el espectro de frecuencias en bandas de tercios de octava de 100 a 5000 Hz. Además, se calculó el valor global (R_w) para todas las bandas de frecuencia; para ello se utilizó el método de comparación contenido en la norma ISO 717-1 [11] y se obtuvieron valores de términos de adaptación espectral C y Ctr, que condicionan el desempeño global de la partición ante ruido comunitario (C) o ruido por tráfico vehicular (Ctr).

A continuación, se abrió un vano en el centro del muro de 0.70x0.70 m (0.49 m²) en el que se colocaron tres modelos de ventanas con diferentes condiciones de apertura (Figura 2 y Figura 3):

- Ventana pivotante con marco de aluminio de 51 mm y cierre de vidrio de 4 mm con sello, colocada con sellador elástico de poliuretano (marca Sika flex 1a),
- Ventana de estructura metamaterial con marco de MDF de 30 mm y estructura de lámina de acrílico transparente de 6 mm y material absorbente en aberturas interiores, colocada con sellador elástico de poliuretano (Figura 3b).

Ambas ventanas se analizaron en diferentes condiciones de apertura (Figura 4):

- Ventana pivotante: ventana cerrada (vc), ventana abierta a 45°(va45), ventana abierta a 30°(va30), ventana abierta a 15°(va15) y ventana abierta a 8°(va8).
- Estructura de metaventana (mm1)

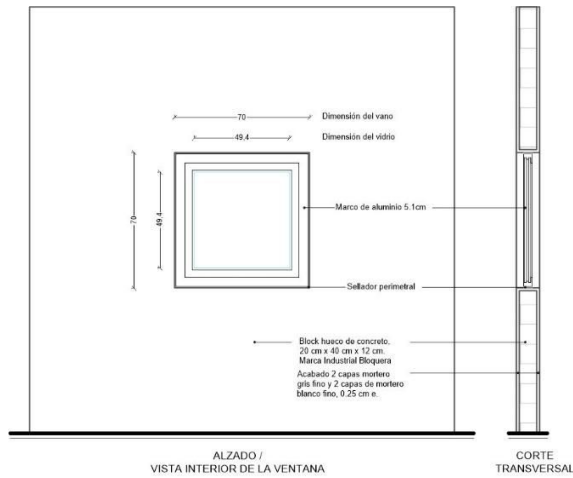


Figura 2. Abertura de vano sobre muro de block de concreto 20x40x12 cm con acabados en ambas caras.

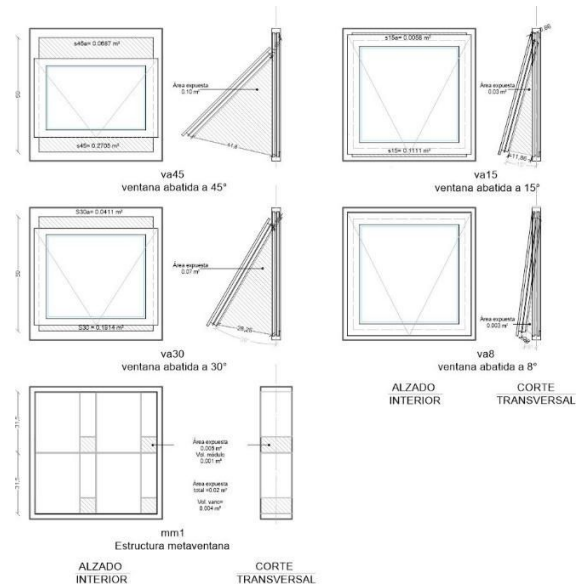


Figura 4. Área de ventilación I. Ventana pivotante: va45, va30, va15, va7 y II. Ventana estructura de metamaterial 1.



Figura 3. Ventanas colocadas en vano: a) Ventana pivotante: cerrada y abierta b) Estructura de metaventana: mm1.

4.1. Índice de reducción acústica de ventana

Para el cálculo de las propiedades de reducción acústica (R_i) y los valores globales (R_w , C y C_{tr}) se repitió el procedimiento seguido en el muro, utilizando la expresión (1) y (3), aunque esta vez se utilizó la superficie del vano como elemento de partición y adicionalmente se calculó el factor de corrección a partir de la expresión (2).

4.1.1. Área de ventilación

Para definir la capacidad de ventilación se consideró la superficie expuesta A_e (área libre del vano) de las diferentes aberturas presentadas. Para la ventana pivotante en sus diferentes condiciones de apertura, se consideró el área libre a paño interior de las dos caras de la abertura de ventana y la base de esta. Para la ventana mm1 se tomó en cuenta la superficie libre de la cara expuesta, las dimensiones se expresaron en m^2 .

Aunque la superficie del vano es la misma ($0.49 m^2$) la superficie expuesta libre del mismo presenta diferentes dimensiones, también por la diferencia en la construcción de las ventanas, la ventana pivotante abierta presenta de tres a cinco caras de superficie expuesta y se estima una incidencia del viento en diagonal.

La estructura de metaventana tiene una superficie de $0.0062 m^2$ repetida en los cuatro módulos y se estima una incidencia perpendicular del viento con valores de incidencia superiores.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Desempeño de la ventana

El índice de reducción acústica global de la ventana cerrada (R_{vc}) es de 30 dB y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño es de 27.3 dB y de acuerdo con los valores de reducción acústica en su espectro, que se observan en la figura 5, se evidencia un desempeño superior en la banda de 500 Hz (27.4 dB) y a partir de la banda de frecuencia de 1000 Hz hasta las 5000 Hz el índice R presenta valores de 28.7 y 41.6 dB.

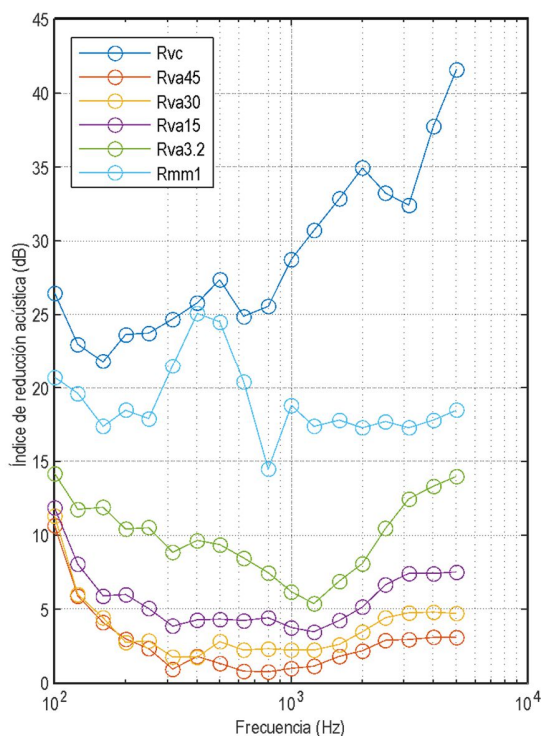


Figura 5. Índice de reducción acústica de ventana: a) Ventana cerrada (R_{vc}), Ventana abierta; b) a 45° (R_{va45}), c) a 30° (R_{va30}), d) Abertura 3.2 cm base ($R_{va3.2}$), y Estructura de metaventana (R_{mm1}).

Cuando se abre la ventana pivotante para los casos de va_8 , va_{15} , va_{30} y va_{45} , el índice de reducción acústica global de la ventana (R_w) para todos los casos es de 12 dB. Al comparar con otras investigaciones [18][25][26] la pérdida es la esperada y concuerda con un promedio de 12 dB para un sistema de cancelería con ventana abierta y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño se reduce entre 7.6 y 1 dB; para va_8 y va_{45} , ello se ve reflejado en el análisis espectral el desempeño es bajo en la mayor parte del espectro entre 3 y 1 dB de reducción y sólo en 100 Hz

presenta valores modestos de 10.7 dB a 11.8 dB en va_{45} , va_{30} y va_{15} , y para va_8 el valor es moderado de 14.20 dB; este último evidencia un desempeño ligeramente superior a las condiciones de ventana.

En la ventana con módulos de estructura de metamaterial el índice de reducción acústica global (R_w) es de 18 dB y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño permanece en 18 dB presentando mejor desempeño en bandas de frecuencias de 315, 400, 500 y 630 Hz de entre 20.4 y 25.1 dB este último para la banda de frecuencias de 500 Hz.

5.2 Índice de reducción acústica de una ventana y su área de ventilación

El desempeño acústico global (R_w) es similar a otros estudios [18][24] incluso entre todas las condiciones de ventana abierta es de 12 dB ante las diferentes condiciones de superficie expuesta libre de 0.59, 0.40, 0.19, 0.02 m², sin embargo, al considerar la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) el desempeño de las ventanas se modifica y corresponde con lo dicho por Salis [15] a mayor dimensión de apertura el desempeño acústico es menor.

La ventana con módulos de estructura de metamaterial (mm1) tiene una superficie expuesta libre de 0.02 m². El indicador R_w es de 18 dB, si se compara la condición de ventana va_8 con la misma área libre y proporción la ventana mm1 supera el desempeño sobre la ventana pivotante va_8 .

Tabla 2. Desempeño de ventanas: índice de reducción acústica global e índice de reducción acústica ante tráfico vehicular

Tipo	R_w [dB]	$R_w + C_{tr}$ [dB]	A_e [m ²]
vc	30	27	0.00
va 45°	12	1	0.59
va 30°	12	3	0.40
va 15°	12	4	0.19
va 8°	12	8	0.02
mm1	18	18	0.02

5.3 Aislamiento acústico de una ventana frente a ruido de tráfico vehicular

Utilizando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) la vc presenta un desempeño de 27 dB y los elementos de ventana pivotante abierta va_{45} , va_{30} , va_{15} y va_8 presentan un desempeño pobre y bajo, en algunos casos como va_{45} , cercano a cero (1 dB), el mejor desempeño de esta ventana es en el

caso va8 con valor de $R_w + C_{tr}$ 8 dB, 4 de su desempeño global que supera la diferencia apenas notable (jnd).

El segundo mejor desempeño se obtuvo en el caso mm1 con valor de $R_w + C_{tr}$ 18 dB igual a su valor global.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza el desempeño acústico de sistemas de ventana ventilada ante ruido de tráfico vehicular. Se observa que el valor global R_w no es recomendable para la toma de decisiones cuando se buscan desempeños específicos, como en este caso el ruido de tráfico vehicular es descrito de forma más eficaz $R_w + C_{tr}$ o a partir del análisis de los valores de R_i para cada banda de frecuencia.

En la mayoría de los casos se presenta bajo aislamiento en bajas frecuencias, es decir mayor aportación de bajas frecuencias en el recinto receptor y por lo tanto en el espacio interior de la vivienda. Las ventanas con apertura y áreas libres disminuyen drásticamente su desempeño en proporción a A_e .

La estructura de metaventana ha demostrado ser una solución superior ante condiciones similares de A_e como el caso de va8. Aunque se sugiere la comparación del desempeño ante el flujo de aire para robustecer su viabilidad.

AGRADECIMIENTOS

La Mtra. Dulce Rosario Ponce Patrón es estudiante doctoral del Programa de doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y recibe una beca del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT). Se agradece el apoyo del Programa de Doctorado y maestría en arquitectura de la UNAM a través del Programa de Apoyo a los Estudiantes de Posgrado (PAEP).

Se agradece el apoyo de la DGAPA-UNAM al proyecto PAPIIT número IT100723: “Medición de absorción, aislamiento y difusión acústica de materiales por reflectometría y transmisión en régimen transitorio”.

8. REFERENCIAS

- [1] COST Action TU0901(2014) “Building acoustics throughout Europe”. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe, 2014. P.
- [2] Torresin S, Albatici R, Aletta F, Babich F, Oberman T, Kang J. Acoustic Design Criteria in Naturally Ventilated Residential Buildings: New Research Perspectives by Applying the Indoor Soundscape Approach. *Applied sciences* 2019; 9, 5401: 01-24
- [3] Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering* 41 (2021) 102773: 1:10
- [4] Yang W, Jeon JY. Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment* 182 (2020) 107121
- [5] De construcción de México, R. (2020). Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico. Gobierno del Distrito Federal.
- [6] Mexicano, G. F. (2010). Código de Edificación de Vivienda CONAVI.
- [7] Garg, N., Sharma, O., & Maji, S. (2012). Design considerations for enhancing sound insulation characteristics of window glazing for traffic noise abatement. *Building Acoustics*, 19(2), 89-97.
- [8] Harvie-Clark, J., & Chilton, A. (2020, October). Acoustics Ventilation and Overheating: Residential Design Guide. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 261, No. 5, pp. 1186-1194). Institute of Noise Control Engineering.
- [9] ISO, E. (2011). 10140-2: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte, 2, 10140-2.
- [10] ISO, E. 10140-1: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte, 1.
- [11] ISO 717-1 Acoustics -Rating of sound insulation in buildings and building elements-. (2013): 1-18
- [12] ISO, E. 16283-3: 2016. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte, 3.
- [13] ISO, E. 12354-3: 2017. Building Acoustics, Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements—Part, 3.
- [14] Kumar, S., Xiang, T. B., & Lee, H. P. (2020). Ventilated acoustic metamaterial window panels for simultaneous noise shielding and air circulation. *Applied Acoustics*, 159. <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.apacoust.2019.107088>
- [15] De Salis, M. H. F., Oldham, D. J., & Sharples, S. (2002). Noise control strategies for naturally ventilated buildings. *Building & Environment*, 37(5), 471. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00047-6)
- [16] Díaz Sanchidrián, C., Pedrero González, A., & Navacerrada Saturio, M. D. L. Á. (2008). Los huecos de las fachadas de los recintos y su protección frente al ruido.
- [17] ASHRAE (Firm). (2017). ASHRAE Pocket Guide for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration: Vol. Ninth edition, SI. ASHRAE.
- [17] Sang-Hoon Kim, Seong-Hyun Lee, "Air transparent soundproof window", *AIP Advances* 4, 117123 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4902155>
- [18] Locher, B., Piquerez, A., Habermacher, M., Ragettli, M., Rösli, M., Brink, M., ... & Wunderli, J. M. (2018). Differences between outdoor and indoor sound levels for open, tilted, and closed windows. *International journal of environmental research and public health*, 15(1), 149.
- [19] Bajraktari, E., Lechleitner, J., & Mahdavi, A. (2015). Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia*, 78, 140-145.
- [20] Yang W, Jeon JY. Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment* 182 (2020) 107121
- [21] Li, X., Tang, S. K., Yim, S. Y., Lee, R. Y., & Hung, T. (2020). Noise reduction of plenum windows on the façade of a high-rise



residential building next to heavy road traffic. Building and Environment, 186, 107353.

[22] Jin, X., Fang, H., Yu, X., Xu, J., & Cheng, L. (2023). Reconfigurable origami-inspired window for tunable noise reduction and air ventilation. Building and Environment, 227(Part 1). <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.buildenv.2022.109802>

[23] Li, X., Tang, S. K., Yim, S. Y., Lee, R. Y., & Hung, T. (2020). Noise reduction of plenum windows on the façade of a high-rise residential building next to heavy road traffic. Building and Environment, 186, 107353.

[24] Waters-Fuller, T., Lurcock, D., Mackenzie, R., & MacKenzie, R. NANR116 Open-Closed Window Research Report.

[25] Cox, T., & d'Antonio, P. (2017). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. CRC press.