

Actualidad sobre el fenómeno aeroacústico de la interacción entre el viento y elementos constructivos

Update on the aeroacoustic phenomenon of the interaction between wind and construction elements

Atualização sobre o fenômeno aeroacústico da interação entre o vento e os elementos construtivos

Pablo Gianoli Kovar, Elizabeth González, José Cataldo

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Montevideo, Uruguay

pgianoli@fing.edu.uy

Recibido: 06/06/2023

Aceptado: 11/12/2023

Resumen: En el trabajo de tesis Doctoral en Ingeniería Ambiental titulado “Protocolo para análisis de fenómenos Aeroacústicos” se recopilaban casos de fenómenos aeroacústicos generados entre la interacción del viento con elementos estructurales en fachadas de edificios o elementos de estructuras, como, por ejemplo, barandillas en puentes. Se vio que el fenómeno aeroacústico está presente, pero no han sido muchos los autores e investigadores que han desarrollado e incursionado en este tema. En este documento se presentarán algunos de los casos identificados en los últimos años, demostrando que es un fenómeno aeroacústico contemporáneo, el cual se reitera debido a los nuevos diseños y materiales constructivos utilizados por la arquitectura moderna. Además, se presentará una recopilación fotográfica realizada en Uruguay de las últimas construcciones con potencial a desarrollar la ocurrencia de dicho fenómeno.

Palabras clave: Acústica ambiental, ruido en estructuras, aeroacústica

Abstract: In the doctoral thesis in Environmental Engineering entitled "Protocol for the analysis of aeroacoustic phenomena" cases of aeroacoustic phenomena generated between the interaction of wind with structural elements on building facades were collected. It was seen that the aeroacoustic phenomenon is present, but there have not been many authors and researchers who have developed and ventured into this topic. In this document some of the cases identified in recent years will be presented, demonstrating that it is a contemporary aeroacoustic phenomenon, which is reiterated due to the new designs and construction materials used by modern architecture. In addition, a photographic compilation made in Uruguay of the latest constructions with the potential to develop the occurrence of this phenomenon will be presented.

Keywords: Environmental acoustics, noise in structures, aeroacoustics

Resumo: No trabalho de tese de Doutorado em Engenharia Ambiental titulado “Protocolo para análise de fenômenos aeroacústicos” se recolhe casos de fenômenos aeroacústicos gerados entre a interação do vento com elementos estruturais em fachadas de edifícios ou elementos de estruturas, como, por exemplo, grades em puentes. Visto que o fenômeno aeroacústico está presente, mas não foram muitos os autores e pesquisadores que desenvolveram e incursionaram neste tema. Neste documento serão apresentados alguns dos casos identificados nos últimos anos, demonstrando que é um fenômeno aeroacústico contemporâneo, el cual se reitera devido aos novos designs e materiais construtivos utilizados pela arquitetura moderna. Além disso, será apresentada uma recopilación fotográfica realizada no Uruguai das últimas construções com potencial para desenvolver a ocorrência do fenômeno.

Palavras chave: Acústica ambiental, ruído em estruturas, aeroacústica.

1. INTRODUCCIÓN

“La relación entre la fachada de un edificio y su estructura sigue siendo una pieza fundamental en la arquitectura.

Comprender la piel de un edificio es como los diseños se abre o cierran, controlando las condiciones ambientales, la luz y la vistas. Ya sean perforados, ranurados o modulares, los Brise-Soleils son volúmenes elegantes que crean nuevas

condiciones espaciales. Esto se puede ver específicamente en Francia, donde los arquitectos están repensando la tradición para dar vida a las nuevas estructuras". Baldwin. E (2021).

Como menciona Baldwin (2021), la fachada de un edificio es una pieza fundamental en la arquitectura, donde los arquitectos pueden colocar su "firma" y su impronta, con diseños que mantienen la idea de la arquitectura antigua, pero con diseños contemporáneos. En la tesis de Maestría titulada "Estudio Acústico de la interacción entre el viento y las edificaciones" (Gianoli, 2020), se ha presentado un tema que en los últimos 10 años ha tenido una repercusión a nivel nacional e internacional. En dicha tesis se recopilaban los últimos fenómenos aeroacústicos generados entre la interacción del viento con elementos estructurales en fachadas de edificios o elementos de estructuras, como pueden ser barandillas en puentes. Asimismo, en ese estudio, se vio que el fenómeno aeroacústico está presente, pero no han sido muchos los autores e investigadores que han desarrollado e incursionado en este tema. En algunos casos se ha modelado e identificado correctamente el fenómeno, pero en otros, no se ha llegado a la caracterización correcta y completa y, por lo tanto, las medidas de mitigación no han sido del todo efectivas.

2. TEORÍA DE LA AEROACÚSTICA

El pionero en aeroacústica fue el matemático James Lighthill, el cual incursionó en el tema alrededor de los años cincuenta del pasado siglo. Además de sus contribuciones en la temática, Lighthill realizó otros aportes en el ámbito de la mecánica de fluidos y el estudio matemático de la propagación de ondas. Su teoría del ruido generado aerodinámicamente se basa en un desarrollo matemático y la introducción de una hipótesis física. Las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan la dinámica de fluidos viscosos compresibles, fueron reagrupadas por Lighthill en una ecuación de onda no homogénea, logrando así una conexión entre la mecánica de fluidos y la acústica. Su reagrupación y el resultado obtenido, se denomina comúnmente como "Analogía de Lighthill". El objetivo de la analogía aeroacústica de Lighthill es estimar el sonido generado por un campo de flujo fluctuante, empleando para ello una metodología consistente en la separación del problema en dos

partes: una primera parte dirigida a la caracterización del campo de flujo fluctuante a partir de principios de la Mecánica de Fluidos que no guarden relación con la propagación de perturbaciones acústicas en el medio y una segunda parte dirigida a la estimación del sonido generado por dicho campo de flujo.

La analogía aeroacústica consiste en una reformulación de las ecuaciones de la mecánica de los fluidos que permite separar los mecanismos de generación de sonido de los mecanismos de propagación del mismo. La parte del flujo en el que se genera el sonido se denomina región fuente, mientras que la parte del flujo en el que se propaga el sonido y donde se coloca el punto de observación se denomina región de propagación o flujo de referencia.

En la Figura 1 se pueden ver las dos regiones comentadas anteriormente.

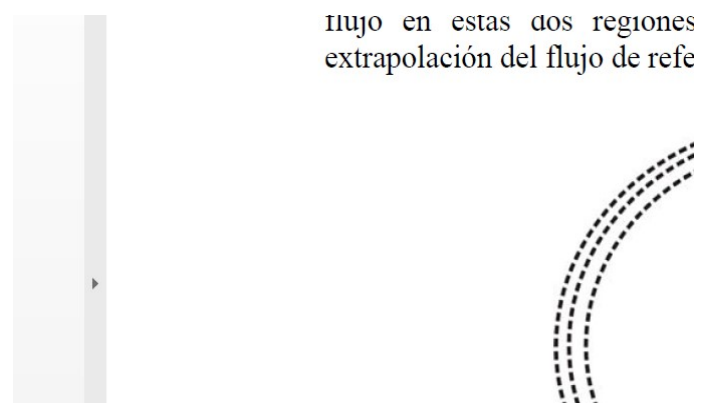


Figura 1. Separación del campo de flujo real. (Extraído de Argüelles Díaz et al, 2004)

Si se realiza un análisis del tensor de Lighthill, T_{ij} , donde T_{ij} es el tensor de tensiones de Lighthill y se define como

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + (p' - c_0^2 \rho') \delta_{ij} - \tau_{ij} \quad (\text{Ec.1})$$

Se tiene que éste incorpora tres procesos aeroacústicos básicos que resultan en la generación de sonido. Por una parte la convección con el flujo a través de las fuerzas no lineales descritas por el tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds, $\rho v_i v_j$, por otra la disipación gradual del sonido por la viscosidad a través del tensor de tensiones viscosas, τ_{ij} y finalmente, la desviación de un comportamiento isentrópico del sonido a través del término $(p' - c_0^2 \rho')$. Matemáticamente el tensor de Lighthill

corresponde a una distribución de cuadrupolos acústicos (Argüelles Díaz et al., 2004).

Argüelles Díaz et al. (2004), cita un ejemplo del ruido generado por un chorro pasando por una boquilla y analizado a partir de la teoría de Lighthill, el cual fue un descubrimiento importante en el área de la aeroacústica. Cuando el punto de observación del sonido se sitúa en el campo lejano, la escala de longitud local relevante es la longitud de onda acústica. En la Figura 2 se muestran los parámetros relevantes para el flujo de un chorro en una boquilla. Se asume que la producción del sonido está dominada por estructuras turbulentas que se escalan con el diámetro de la boquilla L y cuya velocidad por convección típica se escala como V , de modo que la escala temporal del flujo será del orden de L/V .

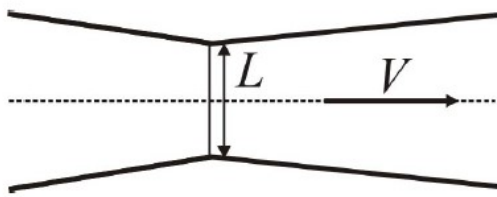


Figura 2. Dimensiones para el ruido de chorro (Tomado de Argüelles Díaz et al. 2004).

Se asume en el análisis, una región fuente compacta, lo que significa que dicha región es pequeña frente con la longitud de onda acústica. De este modo el tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds se escala como $\rho_0 V^2$, y el volumen de integración se escala como L^3 , de modo que el orden de magnitud de las fluctuaciones de presión sonora puede obtenerse a partir del escalamiento de la siguiente ecuación (Ec.2):

$$p'(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi c_0^2 |\vec{x}|^3} x_i x_j \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_{-\infty}^{\infty} [\rho_0 v_i v_j] d\vec{y} \quad \text{Ec.2}$$

Dicha ecuación representa las fluctuaciones de densidad acústica percibidas por un observador en el capo lejano, la misma proporciona resultados exactos para la energía total radiada y su distribución direccional, puesto que solo los términos que decrecen como el inverso de la quinta potencia del vector de posición son excluidos. Dicha expresión se obtiene a partir de la ecuación de Lighthill a la cual mediante la aplicación de la técnica de funciones de Green se llega a ese resultado. Aplicando las escalas mencionadas, se obtiene la siguiente expresión (Ec. 3):

$$p' = c_0^2 \rho' \alpha \frac{V^2 \rho_0 L^2}{c_0^2 L^2 |\vec{x}|} = \frac{\rho_0 M^2 V^2 L}{|\vec{x}|} = \frac{\rho_0 M^4 c_0^2 L}{|\vec{x}|} \quad \text{Ec.3}$$

Donde \bar{M} es el número de Mach del flujo. El orden de magnitud de la intensidad sonora, se obtiene en términos de $\overline{p'^2}$:

$$I \propto \left(\frac{\rho_0 L}{4\pi |\vec{x}|} \right)^2 M^8 \quad \text{Ec.4}$$

De forma que finalmente la potencia acústica radiada se escala como:

$$P_{RAD} = \frac{4\pi |\vec{x}|^2 p'^2}{\rho_0 c_0} \propto \rho_0 c_0^3 L^2 M^8 \quad \text{Ec.5}$$

La expresión anterior constituye la Ley de Lighthill de la octava potencia para el sonido radiado por la turbulencia en un flujo a número de Mach bajo. Dicha Ley fue derivada antes de que se tengan datos experimentales para confirmarla, representando un triunfo de la teoría sobre el experimento (Argüelles Díaz et al., 2004). Antes de la derivación de la ley octava potencia, la mayoría de las mediciones de ruido de chorro turbulento indicaban una dependencia del ruido con la cuarta potencia del número de Mach del flujo. Tras el descubrimiento de Lighthill, se reconoció que la cuarta potencia estaba asociada con las fuentes de ruido dentro del propio motor de chorro, en lugar de con la mezcla turbulenta del chorro a la salida del mismo.

Meadows (1997) afirma que, con este descubrimiento, se pone en manifiesto que la turbulencia en el campo libre es un mecanismo ineficiente de generación de ruido, es decir, que a medida que el número de Mach del flujo se aproxima a la unidad, se produce un cambio drástico en las características del sonido emitido, puesto que la región fuente ya no puede considerarse compacta y además es posible la aparición de ondas de choque en el chorro.

En el congreso de Inter-Noise del 2021 llevado a cabo en la ciudad de Washington D.C el autor S. Donkin realizó una ponencia la cual describía la teoría presentada por Lighthill. En dicha ponencia S. Donking menciona que la teoría de Lighthill, estima el sonido radiado por el flujo en interacción con obstáculos, donde se producen fluctuaciones o turbulencia regulares. Dicha teoría, se basa en la ecuación de movimientos de los gases y propone que una distribución de cuadrupolos estáticos generan efectivamente el campo sonoro. La teoría muestra que la intensidad del campo de sonido depende de la intensidad de los cuadrupolos y la frecuencia. Debido a estas relaciones, se encuentra que la intensidad del

campo sonoro aumenta en proporción a la octava potencia de la velocidad del flujo.

Como la generación de sonido aerodinámico es de interés en una variedad de campos, Lighthill se toma el tiempo para derivar el modelo y así estimar el campo de sonido, tanto matemáticamente como examinando el mecanismo físico detrás de la conversión de la cinética del flujo en energía acústica. S. Donkin (2021) afirma que Lighthill considera la ineficiencia con que la energía cinética se convierte en energía acústica y el aumento de la eficiencia del fenómeno se da al aumentar la velocidad del flujo. Este aumento en la eficiencia es particularmente cierto para el sonido emitido en paralelo con el vector de velocidad de flujo, es decir, en sentido del flujo, hacia adelante.

Uno de los accesorios utilizados habitualmente en la actualidad son las placas de vidrio en fachadas, o perfiles planos rectangulares en balcones, tal cual se presentarán más adelante en esta publicación. Como primera aproximación al problema de placas planas D.J. Moreau et. al (2010) analizan el ruido generado en el borde de salida de una placa plana inmersa en un flujo turbulento. Los autores tomaron medidas experimentales en un túnel de viento anecoico obteniendo resultados importantes para este estudio. Se utilizaron cuatro micrófonos, uno montado en el borde de fuga, uno debajo del borde de fuga, uno adyacente al borde de fuga y otro sobre el borde de ataque. Esta estrategia permitió estudiar no solo la intensidad del ruido, sino que también la directividad del mismo. El ruido propio del perfil aerodinámico se produce cuando el flujo inestable interactúa con una superficie del perfil aerodinámico. El ruido del borde de fuga es uno de los muchos tipos de ruido propio del perfil aerodinámico y se considera un mecanismo importante de generación de ruido en muchas aplicaciones (D.J. Moreau et. al 2010).

El ruido del borde de fuga se produce cuando la turbulencia de la capa límite pasa por convección más allá del borde de fuga del perfil aerodinámico. D.J. Moreau et. al son de la corriente de investigadores que creen que se forma una fuente de ruido cuadrupolar generadas por turbulencia de la capa límite y son difractados por el borde de salida y el sonido radiado es de naturaleza dipolar, cuando el perfil aerodinámico es acústicamente compacto, es decir $C \ll \lambda$, donde C es la cuerda aerodinámica y λ es la longitud de onda acústica. Según los autores,

para este caso, el borde de salida afilado irradia ruido proporcional a M^6 , donde M es el número de Mach. Para el caso no compacto, donde $C \gg \lambda$, el campo de sonido irradiado no presenta un comportamiento multipolar, con una amplitud proporcional a M^5 . Además del ruido de banda ancha generado por la capa límite turbulenta con el borde de arrastre, puede generarse un ruido tonal debido al vórtice que se desprende del borde de salida posterior, tal cual lo describen Brooks et al. (1989).

Allen et al. (2002), afirman que una característica del ruido del borde de salida es un sonido irradiado a los lados opuestos de la superficie aerodinámica, teniendo una misma magnitud y una diferencia de fase de 180° . Esta afirmación fue fundamental en el estudio realizado por D.J. Moreau et. al (2010). La configuración de micrófonos en este tipo de ensayos tiene su dificultad, por tal motivo Kunze et. al 2004, en ensayos experimentales, proponen colocar dos micrófonos en el campo lejano, en lados opuestos del perfil y a la misma distancia radial desde el borde posterior, lo cual registrará el ruido radiado del borde posterior para que sea igual en magnitud y 180° desfasado. Kunze et al. 2004, utilizaron este conocimiento para aislar el ruido del borde posterior de las fuentes del ruido de fondo en mediciones acústicas para campo lejano. Según los datos experimentales obtenidos por Kunze et. al 2004, mostraron cierta concordancia con las predicciones teóricas del ruido del borde de salida desarrolladas por Howe (1978).

En la tesis de doctorado en aeroacústica, se está trabajando en profundizar lo planteado por los autores mencionados, teniendo como sustento la teoría de aeroacústica de James Lighthill, con el objetivo de caracterizar y comprender a este fenómeno, no solo en placas planas paralelas, sino que también en placas perforadas, las que actualmente son utilizadas en la arquitectura contemporánea. Se tiene como desafío principal, desarrollar un dispositivo que permita replicar el fenómeno aeroacústico, a lo que se le suma, el diseño del posicionamiento de micrófonos, los cuales permitirán registrar dicho fenómeno a ser evaluado y analizado.

Parte de este trabajo de tesis Doctoral fue realizar un relevamiento de los últimos casos de este fenómeno aeroacústico y así, recopilar en qué condiciones se genera dicho fenómeno, además, en paralelo, se realizó un relevamiento fotográfico de las últimas

construcciones del país, las cuales son de interés para este estudio, es decir, que son potenciales estructuras donde podría instalarse este fenómeno aeroacústico.

3. ACTUALIZACIÓN DE CASOS INTERNACIONALES

Luego de la presentación de Tesis de Maestría en el año 2020, donde se recopilaban los casos más relevantes, no solo a nivel nacional sino también a nivel internacional, se continuó con la búsqueda y la actualización de eventos que demostraran que el fenómeno aeroacústico efectivamente se encuentra presente debido a la utilización de esta nueva tendencia arquitectónica.

Uno de los casos más relevantes de estos últimos 3 años se produjo en junio del 2020, en la primavera americana. En ese mes se comenzaron con las modificaciones de las barandillas del puente Golden Gate en San Francisco, California. El objetivo de estas modificaciones según lo declarado por Cosulich-Schwartz, ingeniero de mantenimiento y control, era el de aumentar la aerodinámica del puente y así disminuir las cargas ejercidas por el viento sobre la estructura. Para ello se instaló un tipo de barandilla que favorecía no solo en el peso total de la estructura sino también en la aerodinámica, frente a los fuertes vientos que caracterizan la zona (ver Figura 3).

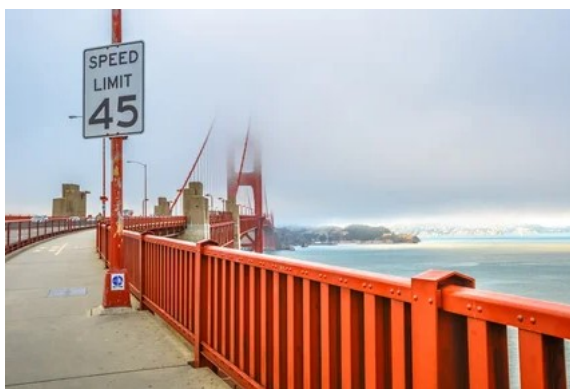


Figura 3. Barandillas del puente Golden Gate en San Francisco, California. (Foto: <https://www.alamy.es/>).

Al finalizar la instalación de las mismas, los usuarios habituales del puente, turistas y residentes de zonas próximas declararon percibir un zumbido intenso proveniente de dicho puente. Cosulich-Schwartz declara en medios de comunicación local que el zumbido proviene directamente de la interacción del

viento con las nuevas barandillas instaladas en el puente. Según lo recopilado por medios de comunicación (BBC News), los ingenieros realizaron mediciones en la zona, encontrando que la frecuencia que predominaba en este fenómeno aeroacústico se generaba en los 440 Hz, un sonido muy similar a la nota musical *La*. Además, los técnicos notaron que, a cuando el viento se posicionaba en dirección Norte o Sur, aparecían tonos más agudos. Este último comportamiento se identificó en uno de los casos estudiados en la Tesis de Maestría “Estudio Acústico de la interacción entre el viento y las edificaciones”, donde se encontraron frecuencias predominantes como 500 Hz y 630 Hz y frecuencias agudas (4 kHz, 5kHz y 6.3 kHz) para direcciones de viento con cierto ángulo de ataque sobre los parasoles rectangulares vidriados de uno de los edificios en estudio (Gianoli, 2020).

Según lo informado al medio de comunicación BBC News en diciembre de 2021, los técnicos sugirieron colocar unas presillas de goma en cada una de las 12.000 barandillas, reduciendo en un 75 % el ruido generado por este fenómeno. Se estimó, en ese entonces, un costo total de al menos U\$S 450 mil dólares la colocación de estas presillas de goma a lo largo de todo el puente. Hasta el momento no se cuenta con la información de si realmente fue implementada dicha medida de mitigación.

Otro de los casos relevantes que fueron comentados por los medios de comunicación, se generó en un nuevo edificio en la ciudad de Edmonton, capital de la provincia de Alberta en Canadá. Los residentes próximos al cruce 124th Street y 102nd Avenue denunciaron sobre un “zumbido” muy intenso que se generaba en determinados periodos del día y de forma aleatoria. El edificio de 27 pisos presenta unas barandillas paralelas en cada uno de los balcones, tal cual se puede observar en la Figura 4.

En mayo del 2020 los residentes comenzaron a percibir un zumbido muy intenso que provenía del nuevo edificio. Semanas después, de que el evento persistiera, los ingenieros de la empresa HGC Engineering declararon que, efectivamente, el ruido era generado por el viento que fluye a través de las barandillas, en determinadas condiciones de dirección y velocidad de viento. Según lo mencionado, se realizaron ensayos para determinar las causas para posteriormente aplicar una medida de mitigación en cada uno de los balcones (Fuente: CBC News). Se

desconoce si efectivamente se solucionó el problema y si se aplicó alguna medida de mitigación en este caso.

En el estado de Nueva York, EEUU se encuentra en continuo crecimiento en lo que respecta a su infraestructura civil. En la ciudad de Brooklyn, se han construido grandes edificios en los últimos años y el fenómeno aeroacústico ha estado presente, donde los residentes actualmente conviven con dicho fenómeno, ocasionando molestias en los vecindarios próximos a estas grandes construcciones.



Figura 4. Edificio en la ciudad de Edmonton, capital de la provincia de Alberta en Canadá. Fuente CBC News.

Uno de los casos trascendidos a la prensa, es de un edificio lujoso construido en abril del 2021 en dicha ciudad. Los residentes de la zona denunciaron sobre un ruido agudo y molesto que aparecía de forma aleatoria. Tal cual se puede observar en la Figura 5 dicho edificio presenta balcones contruidos con perfiles tipo placa de vidrio. Por lo declarado por los técnicos responsables en abril del 2021, se comenzaron a implementar medidas de mitigación provisorias, como colocar redes en balcones y ratificar que efectivamente el sonido se generaba en esos puntos. En la actualidad, el sonido persiste y se han hecho innumerables denuncias de este caso.



Figura 5. Balcones y primeras medidas implementadas. Fuente: WABC-TV, canal 7, NY-EEUU.

Este último edificio no es el único “edificio silbante”, en diferentes zonas de Brooklyn; otro caso conocido y de la actualidad es del vecindario Forte Greene, los residentes han realizado cientos de denuncias a las autoridades, específicamente al Departamento de Protección Ambiental de la Ciudad de Nueva York. Estas denuncias son debidas al silbido constante que se generan en determinadas condiciones ambientales que alcanzan a las zonas residenciales. Estos silbidos aparecen en horas de la madrugada, generando molestia en horarios de descanso.

La nota que realizó PIX 11 el 11 de noviembre del 2022 a los residentes de Forte Greene indica que en los últimos años se han construido nuevos edificios, como es el caso de la nueva Torre de Brooklyn (The Brooklyn Towers) próxima a la zona residencial mencionada. En la Figura 6 se puede observar cómo, en dirección Este, se encuentra el vecindario Fort Greene, caracterizado por ser un vecindario tranquilo y familiar, mientras que al Oeste se pueden observar los edificios de gran porte contruidos en los últimos años, entre ellos la Torre de Brooklyn, edificio moderno construido en el 2022 con una altura de un poco más de 300 metros.



Figura 6. Brooklyn, vecindario Fort Greene. Fuente: Google Earth.



Figura 7. Brooklyn Tower y nuevas construcciones.
(Fuente: New York Yimby).

Ese aumento de edificios modernos y lujosos ha traído consigo a este fenómeno aeroacústico, que en algunos casos ha sido difícil identificar efectivamente su origen. Según lo declarado por las autoridades, a comienzo del año 2023 se comenzaron con las inspecciones a las nuevas construcciones, pero según lo mencionado por los residentes, el sonido persiste y en determinados momentos se hace molesto y muy intenso.

4. RELEVAMIENTO FOTOGRÁFICO DE NUEVAS CONSTRUCCIONES EN URUGUAY

Como se presentó en Gianoli (2020), Uruguay no está libre de dicho fenómeno aeroacústico. Se identificaron y abordaron dos casos con elementos constructivos distintos, pero obteniendo como resultado el mismo fenómeno. El objeto de estudio en uno de los edificios fue una serie de chapas perforadas ubicadas en su azotea, donde se identificaron tonos en frecuencias de 4000 Hz y 5000 Hz.

El otro caso fue el de una fachada con parasoles vidriados ubicados de forma aleatoria en toda su fachada principal (Figura 9). Para este segundo objeto de estudio, se identificaron, en diferentes condiciones de velocidad y dirección de viento, tonos en las frecuencias de 500 Hz y 630 Hz, identificando, además, en determinadas condiciones, tonos en frecuencias más altas, como 4000 Hz y 5000 Hz.



Figura 8. Izq. Chapa metálica perforada azotea Caso 1.
Fuente: Gianoli. P (2020).



Figura 9. Parasoles vidriados, Caso 2. Fuente: Gianoli. P (2020).

Durante el estudio del fenómeno aeroacústico, se ha realizado una recopilación fotográfica de las nuevas construcciones, no solo en Montevideo sino también en ciudades del interior del país. Se ha visto que en los últimos años es más evidente el cambio de época en la arquitectura nacional, donde los Arquitectos buscan no solo destacar en confort, sino también buscan darles su impronta a dichos diseños constructivos. Esa “impronta” conlleva a la utilización de elementos constructivos poco tradicionales, ya sean placas metálicas perforadas, perfiles de acrílico o vidrio de diferentes formas y

tamaños. Esta nueva tendencia en la arquitectura crea la necesidad de estudiar el comportamiento de estos elementos en la interacción con el viento. En lo que sigue se presentarán algunas imágenes de construcciones inauguradas recientemente en Uruguay, donde se emplean estos elementos constructivos.

Una de las obras de interés, ubicada en una zona residencial, fue la remodelación de la Sede del Club Nacional de Fútbol, ubicada sobre Avda. 8 de octubre, Montevideo. Las reformas fueron realizadas en el año 2022. Se le agrega a la fachada principal una chapa metálica ondulada con perforaciones, tal cual se puede observar en la Figura 10.

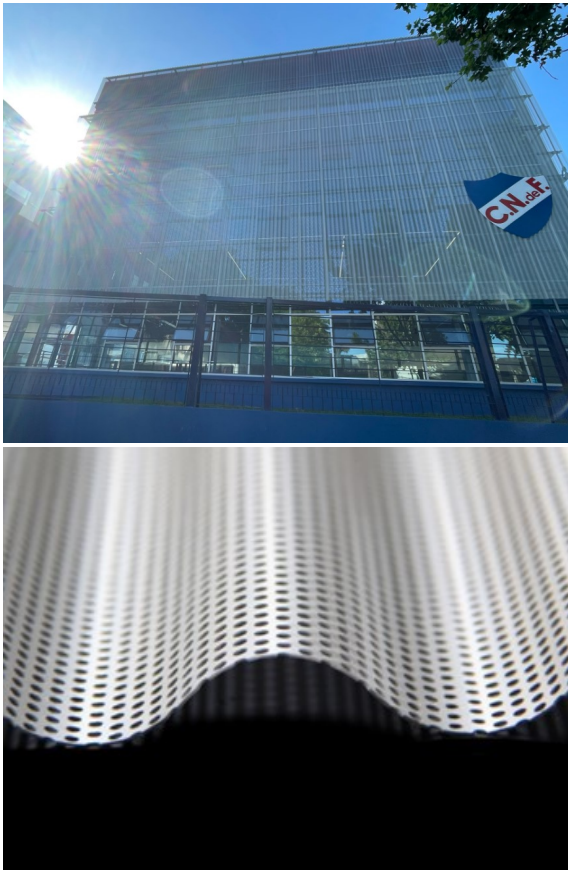


Figura 10. Fachada realizada con placa ondulada perforada. Fuente: elaboración propia, fotos: setiembre 2022.

En la Figura 11 se presenta la ampliación del Hospital Policial, inaugurada en el año 2019. El nuevo edificio central posee una fachada con placas de vidrio colocadas verticalmente y separadas de forma aleatoria. La misma metodología empleada para la fachada en uno de los casos de estudio presentados en Gianoli (2020), donde se hizo presente el fenómeno aeroacústico.



Figura 11. Fachada con placas vidriadas. Fuente: elaboración propia, fotos noviembre 2022.

En febrero del 2019 se finaliza con una obra muy particular en el centro de Montevideo, específicamente en el barrio Palermo. Un edificio de 10 pisos (Figura 12) destinado a viviendas en que los proyectistas buscaron una fusión de arte y candombe en una zona donde este último forma parte de la cultura uruguaya. El edificio es un proyecto totalmente sustentable con paneles solares, aislación térmica y posee un sistema de recolección de agua. Cuenta con persianas móviles en cada una de sus plantas; estas persianas presentan perforaciones de diferentes diámetros y ubicadas de forma aleatoria.

En los últimos años se han renovado la imagen de las Jefaturas de Policía del país. Los diseñadores optaron por la utilización de las chapas onduladas perforadas (modelo softwave 50, marca Hunter Douglas ®), realizando una combinación de colores que le da un aspecto “amigable” a estos nuevos edificios. En la Figura 13 se puede observar la jefatura de Montevideo de la Zona III, donde la colocación de estos paneles se realiza con una estructura metálica adosada a la fachada de la construcción, dejando una cámara de aire de al menos 60 centímetros, instalación que se repite en obras similares.

Una de las últimas obras realizadas en Salto, específicamente el recinto donde se instaló la Sociedad Médico Quirúrgica de Salto, fue inaugurada en el 2019. Para esta obra se empleó una chapa perforada modelo CD 400 (Hunter Douglas ®) la cual es utilizada para revestimiento por el sistema de traba, el cual permite una buena resistencia mecánica y siendo, además, agradable a la vista.



Figura 12. Nuevo edificio sustentable ubicado en el centro de Montevideo. Fuente: elaboración propia.



Figura 13. Fachadas de las nuevas jefaturas policiales del Uruguay. (Fuente: <https://www.luz-arte.com/>).

En la Figura 14 puede observarse una de sus cualidades, durante el día las perforaciones de estas placas distribuyen la luz solar de manera uniforme, pero no permiten ver desde fuera hacia dentro del edificio.



Figura 14. Sociedad Médico Quirúrgico de Salto. (Fuente: <https://www.luz-arte.com/>).

Por último, es importante mencionar estacionamientos privados de construcción rápida los cuales además de utilizar perfilaría metálica, utilizan como fachada principal chapas perforadas de diferentes diseños, alcanzando construcciones de más de 20 metros de altura. Este tipo de construcción aparece reiteradamente en la zona céntrica de la capital.

En la Figura 15 se presenta el estacionamiento privado construido en la calle Palmar, con las características mencionadas.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un relevamiento bibliográfico y fotográfico, no solo de los casos donde efectivamente se da la ocurrencia de este nuevo fenómeno aeroacústico, sino que también se obtuvo un relevamiento de las nuevas construcciones en Uruguay que son potenciales candidatas a la ocurrencia de dicho fenómeno.



Figura 15. Estacionamiento privado ubicado en la calle Palmar esq. Dr. Cassinoni. Montevideo. Fuente: elaboración propia, foto febrero 2023.

Con estos casos se puede observar que es un fenómeno que no solo se da puntualmente y en ocasiones, sino que su ocurrencia se está haciendo habitual, de tal modo que en algunas ciudades los residentes conviven con este fenómeno tan molesto. De aquí la importancia de obtener una caracterización del problema y desarrollar un protocolo de abordaje al mismo, analizando los nuevos materiales constructivos utilizados en la arquitectura contemporánea.

La tesis Doctoral titulada “Protocolo para análisis de fenómenos aeroacústicos” se encuentra en su fase experimental, lo cual permitirá caracterizar los elementos constructivos utilizados en la actualidad y obtener un acercamiento al fenómeno estudiado. Se pretende, además, que dicho protocolo se considere al momento de evaluar el comportamiento del viento en futuros diseños constructivos.

REFERENCIAS

'A giant wheezing kazoo': Golden Gate Bridge starts to 'sing' after design fix.
<https://www.theguardian.com/us-news/2020/jun/06/golden-gate-bridge-san-francisco-sings>

Se cuenta con muestras y diseños proporcionadas por la empresa Luz y Arte, representante de la marca Hunter Douglas®, las cuales serán ensayadas acústicamente en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Udelar. Como se puede observar en la Figura 16, se cuenta, entre otros diseños, con placas perforadas de diferentes características y estructuras conformadas por perfilaría metálica.

Se espera en el corto plazo contar con una caracterización completa del fenómeno y un nuevo protocolo de estudio, que pueda ser considerado en la ingeniería civil del país.

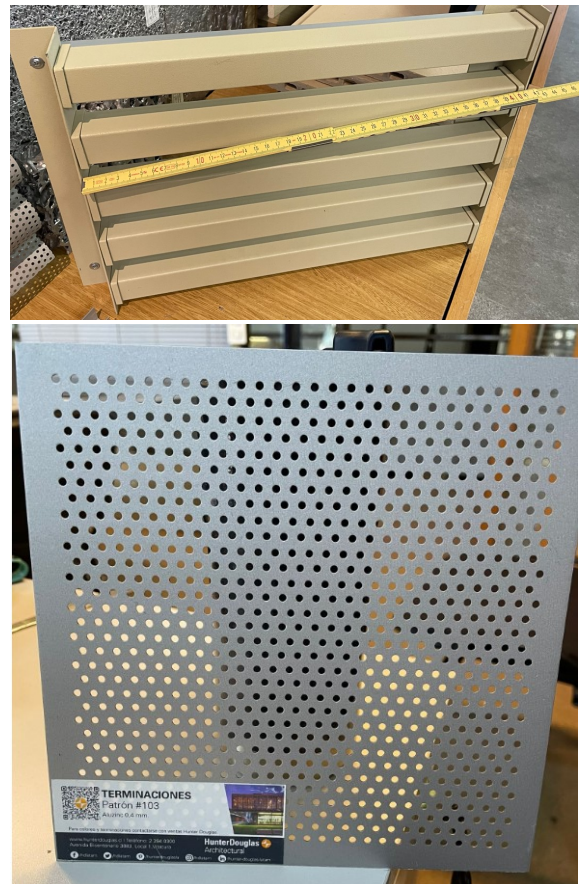


Figura 16. Muestras a ensayar. Sup. Perfiles rectangulares paralelos. Inf. Placa perforada.

Argüelles Díaz et al. (2004) “Ruido Aerodinámico Tonal Radiado por un ventilador axial en campo lejano: Mecanismos de generación y propagación del mismo”.

Baldwin.E (2021) “Dominando el Brise-Soleil en Francia” (<https://www.archdaily.cl/>).

- Donkin S. (2021) Overview of M. J. Lighthill's and M. H. A. Newman's 1952 paper on "On Sound Generated Aerodynamically. General Theory."
- Gianoli, P. (2020). Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental "Estudio Acústico de la interacción entre el viento y las edificaciones". <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/25381/1/Gia19.pdf>
- Howe M.S. (1978) "A review of the theory of trailing edge noise". Journal and Sound and Vibration, 61(3):437–465, 1978.
- 'It sounds like a headache': Mystery sound plagues Brooklyn neighborhood <https://pix11.com/news/local-news/brooklyn/it-sounds-like-a-headache-mystery-sound-plagues-brooklyn-neighborhood/>
- C. Kunze. (2004) "Acoustic and velocity measurements in the flow past an airfoil trailing edge". Master's thesis, Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Indiana, 2004.
- Luz y Arte <https://www.luz-arte.com/>
- Meadows R. (1997) "A Study of Fundamental Shock Noise Mechanisms"
- "Mysterious ringing sound rattles residents in central Edmonton" <https://www.cbc.ca/news/canada/edmonton/mysterious-ringing-sound-rattles-residents-central-edmonton-1.5557207>
- Moreau D.J. (2010) "Acoustic analysis of flat plate trailing edge noise".
- "Neighbors rattled by shrieking noise coming from New York luxury high rise" <https://www.kiro7.com/news/trending/neighbor-s-rattled-by-shrieking-noise-coming-new-york-luxury-high-rise/3NSXCSGSQ5CY7P4XQPWQTLW2CE/>

AVISO DE RESPONSABILIDAD

Los autores son los únicos responsables del material incluido en este documento.