VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Diseño y evaluación experimental de un encerramiento acústico ventilado con silenciador acústico ventilado para maquinaria accionada por motor eléctrico

Joel Everardo Valtierra Olivares, López Baez Israel y David Silva Ramos
Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Ex-Hacienda de San Matías s/n; C.P.36020; Guanajuato, Gto.
valtierra.je@ugto.mx., israel.baez@ugto.mx, d.silvaramos@ugto,mx

Resumen

El objetivo de este trabajo fue diseñar, fabricar y evaluar experimentalmente un encerramiento acústico ventilado construido con madera de tablero de virutas orientada OSB (Oriented Strand Board) de 19 mm de espesor y un silenciador acústico ventilado tipo laberinto fabricado mediante impresión 3D FDM (Modelado por deposición fundida).

Se planteó como hipótesis que la reducción del área efectiva de ventilación incrementa la atenuación acústica debido al aumento de la impedancia acústica del sistema, aunque simultáneamente disminuye la capacidad de disipación térmica.

Se analizó la influencia del área de ventilación sobre la atenuación acústica, la velocidad del flujo de aire y la temperatura interna de operación del motor, con el propósito de identificar una configuración que proporcione un equilibrio adecuado entre reducción de ruido y disipación térmica.

El diseño de soluciones de aislamiento acústico para este tipo de equipos constituye un desafío técnico, ya que debe garantizar una ventilación adecuada, el empleo de materiales de bajo costo con propiedades de aislamiento acústico y un espacio reducido que permita condiciones seguras de operación. En este contexto, se propone el diseño y evaluación de un encerramiento acústico ventilado como una plataforma para analizar la influencia de diferentes condiciones físicas sobre la atenuación del ruido generado por maquinaria accionada por motor eléctrico con elevados niveles de presión sonora y generación de calor durante su funcionamiento.

Para el desarrollo de la evaluación experimental se utilizó una maquina mini esmeriladora angular de 850 W para generar las condiciones físicas de ruido, temperatura y ventilación de una máquina herramienta movida por un motor. Analizar las condiciones de nivel de presión sonora, temperatura y flujo de aire en condiciones de apagado/encendido tanto dentro como fuera del encerramiento acústico, utilizando un anemómetro, un termopar tipo K y sonómetro. Los resultados muestran con un área de ventilación de 1200 mm^2 presentó el mejor equilibrio entre reducción de ruido, velocidad de aire y control térmico.

Palabras clave: Madera OSB, aislamiento vibratorio, ventilación forzada, silenciador acústico ventilado.

Introducción

El ruido industrial es uno de los agentes físicos más comunes en ambientes de manufactura. La exposición prolongada a niveles elevados puede ocasionar pérdida auditiva inducida por ruido (PAIR), dificultades de comunicación y estrés ocupacional (NIOSH, 2024; OSHA, 2024). Las máquinas herramienta generan altos niveles de presión sonora debido a fricción, operaciones de corte y vibraciones mecánicas (Bies & Hansen, 2017).

Aunque existen numerosos estudios sobre encerramientos acústicos industriales, son limitados los trabajos que analizan simultáneamente la interacción entre ventilación forzada, disipación térmica y atenuación sonora en sistemas de bajo costo fabricados con materiales de amplia disponibilidad como la madera OSB.

Dentro de la jerarquía de control, el confinamiento acústico de la fuente sonora es una de las estrategias más eficaces (ISO 15667, 2000). Sin embargo, la acumulación de calor dentro de un confinamiento hace indispensable un sistema de ventilación, natural o forzado. Si las aberturas de ventilación no cuentan con un silenciador adecuado, estas se convierten en la principal ruta de fuga sonora.

La selección del tablero OSB (*Oriented Strand Board*) para la fabricación del encerramiento acústico se fundamentó en sus propiedades estructurales y acústicas, que favorecen la reducción de la transmisión del ruido generado por una máquina herramienta con motor eléctrico. Su densidad y rigidez contribuyen al aislamiento sonoro, mientras que su facilidad de manufactura, disponibilidad comercial y bajo costo permiten desarrollar una solución eficiente y viable. Además, puede combinarse con materiales absorbentes para mejorar la atenuación acústica global del sistema.

Cálculo de la pérdida por inserción acústica

La eficacia del encerramiento acústico se evaluó mediante la pérdida por inserción (Insertion Loss, IL), definida como la diferencia entre el nivel sonoro medido sin encerramiento y el nivel sonoro medido con el encerramiento instalado:

$$IL = L_{sin} - L_{con}$$

Donde:

IL= Pérdida por inserción (dB)

L_{sin}= Nivel sonoro sin encerramiento (dB(A))

L_{con}= Nivel sonoro con encerramiento (dB(A))

Una mayor pérdida por inserción indica una mejor capacidad de reducción de ruido por parte del sistema.

La mini esmeriladora angular fue seleccionada como fuente sonora debido a que representa una máquina herramienta compacta accionada por motor eléctrico capaz de generar simultáneamente niveles elevados de ruido y calor durante su operación. Estas características la convierten en un equipo adecuado para evaluar el desempeño de sistemas de aislamiento acústico ventilados bajo condiciones controladas de laboratorio.

Metodología y equipamiento experimental

Diseño y fabricación del encerramiento acústico

El encerramiento acústico se construyó en madera de tablero OSB (*Oriented Strand Board*), el cual es un panel de ingeniería formado por capas de astillas o virutas de madera unidas con resinas sintéticas y prensadas. Destacada por su alta resistencia mecánica, estabilidad dimensional y excelentes propiedades como aislante térmico y acústico. El panel OSB tiene un espesor de *19* mm, el encerramiento acústico tiene las dimensiones de 43 cm de largo, 45 cm de alto y 23 cm de ancho, estas medidas están basadas en la integración de la mini esmeriladora, los ventiladores eléctricos y el silenciador acústico ventilado. Adicionalmente, en las uniones internas y externas del encerramiento se utilizó un sellador acrílico para reducir la fuga de ruido, también se incorporaron elementos de caucho elastomérico para aislar las vibraciones de la máquina hacia la estructura, además, se incorporó un empaque de plástico en las orillas del encerramiento para sellar con la tapa y evitar fugas de ruido, ver figura 1.

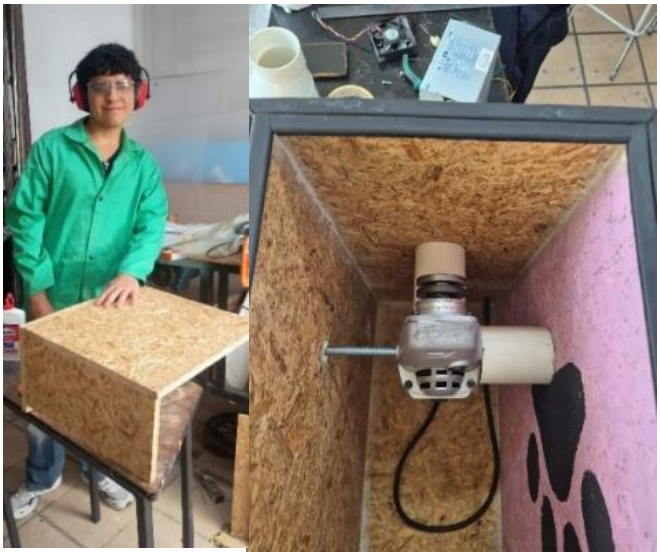


Figura 1. Fabricación del encerramiento acústico.

Para reducir las vibraciones que produce la máquina esmeriladora, se instalaron dos soportes de caucho en las paredes laterales del encerramiento acústico los cuales dan soporte a los tornillos que sujetan a la esmeriladora. Las vibraciones mecánicas transmitidas por el motor a la estructura del encerramiento provocan que las paredes rígidas actúen como radiadores secundarios de sonido (Crocker, 2007).

Diseño y desarrollo de silenciador acústico ventilado

El diseño y desarrollo del silenciador acústico ventilado se fabricó por medio de impresión 3D **FDM** (Modelado por deposición fundida), utilizando un finalmente **PLA (Ácido Poliláctico)** el cual es un material, económico y fácil de usar en la impresión 3D FDM, la función del silenciador es permitir el flujo del aire y al mismo tiempo atenuar el ruido ocasionado por la esmeriladora, se propuso un silenciador tipo laberinto el cual fuerza al aire a realizar múltiples cambios de dirección, esto incrementa la pérdida de energía sonora por reflexiones internas sin bloquear por completo el flujo de aire generado por los ventiladores axiales de inyección y extracción (Bies & Hansen, 2017; Crocker, 2007).

Debido a consideraciones relacionadas con la protección de la propiedad intelectual del desarrollo tecnológico, las imágenes detalladas del prototipo fueron omitidas. No obstante, los parámetros constructivos y operativos necesarios para la evaluación de su desempeño acústico se describen de manera suficiente para garantizar la validez científica del estudio.

Instrumentación utilizada

Para la evaluación experimental del sistema se emplearon diferentes instrumentos de medición orientados al monitoreo de las variables acústicas, térmicas y de ventilación. El nivel de presión sonora se registró mediante un sonómetro digital marca Steren, utilizado para cuantificar el ruido en dB(A) y determinar la atenuación obtenida durante las modificaciones realizadas al diámetro central del diseño del silenciador. Asimismo, la temperatura de operación se monitoreó con un multímetro equipado con termopar tipo K, cuya sonda fue instalada sobre la carcasa de la mini esmeriladora en la zona de mayor generación de calor. Adicionalmente, se utilizó un anemómetro Kestrel 5500 para medir la velocidad del flujo de aire (m/s) a la salida del silenciador, empleando un cono de acoplamiento para canalizar la corriente de aire hacia el instrumento. La Tabla 1 presenta los instrumentos utilizados durante el estudio.

***Tabla 1**. Instrumentos*

Instrumentos	Modelo	Variable	Resolución	Precisión
Sonómetro	Steren	Nivel sonoro	0.1 dB	±1.5 dB
Anemómetro	Kestrel 5500	Velocidad del aire	0.1 °C	±1 °C
Termopar tipo K	Multímetro digital	Temperatura	0.1 m/s	±3 % de la lectura

Como parte de la evaluación experimental, se consideró la precisión de los instrumentos empleados para la adquisición de datos. No obstante, las mediciones realizadas están sujetas a la incertidumbre inherente de cada equipo, lo que puede introducir variaciones en los valores registrados de nivel de presión sonora, temperatura y velocidad del aire. Debido a que el estudio tuvo como objetivo principal evaluar tendencias comparativas entre diferentes configuraciones del sistema, los resultados deben interpretarse considerando las tolerancias instrumentales asociadas a cada medición.

Sistema de ventilación forzada

El sistema de ventilación forzada está conformado por dos ventiladores que estaban disponibles para la realización del proyecto, estos son el ventilador Nidec TA450DC (Modelo B35502-35), 12 V DC, 1.40 A flujo nominal de 160 CFM (4.53 m^3/min) ver figura 3A, este ventilador está posicionado al interior del encerramiento y su función será expulsar el flujo de aire al exterior, el otro ventilador marca Delta Electronics (Modelo AUB0912VH), 12 V DC, 0.60 A, flujo nominal de 67.8 CFM (1.92 m^3/min) ver figura 3B, está posicionado al exterior del encerramiento acústico y su función es inyectar aire fresco al interior.



(A) (B)

Figura 3. Ventiladores.

Pruebas de experimentación

El experimento se realizó con una temperatura ambiente de 27°C siguiendo un protocolo secuencial de 3 fases:

Fase 1: Se midió el ruido de fondo y la temperatura ambiente en el laboratorio de física con la mini esmeriladora y los ventiladores de encerramiento acústico apagado y para registrar el ruido de fondo. Para cada condición experimental se efectuaron tres mediciones consecutivas, registrando el valor promedio del nivel de presión sonora expresado en dB(A). Las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones ambientales con una temperatura promedio de 27°C.

Fase 2: Se encendió la mini esmeriladora sin la tapa del encerramiento acústico para medir la presión sonora en dB(A) y la temperatura, se tomaron lecturas dentro y fuera del encerramiento acústico.

Fase 3: Se realizan pruebas con la esmeriladora, la ventilación encendida y se fue variado el área de abertura del silenciador acústico ventilado. Se evaluó tres áreas de apertura de 2900 mm^2, 1200 mm^2 y 830 mm^2, el sistema se mantuvo en operación continua durante 5 minutos para garantizar que la temperatura alcanzara una estabilidad permanente por cada prueba. Al finalizar cada prueba se registró el nivel ruido sonoro en dB(A), la velocidad del flujo de aire en la salida del cono en m/s y la temperatura que media el termopar tipo K alcanzada dentro del encerramiento acústico, ver figura 4.



Figura 4. Banco experimental.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos indican que la disminución del área de ventilación produjo un incremento progresivo de la atenuación acústica. Este comportamiento puede atribuirse a que la reducción de la sección de paso incrementa la impedancia acústica de la trayectoria de escape del ruido. Como consecuencia, una mayor fracción de la energía sonora es reflejada y disipada dentro del silenciador tipo laberinto y del volumen interno del encerramiento acústico. Asimismo, los múltiples cambios de dirección impuestos por la geometría del silenciador favorecen la pérdida de energía acústica mediante reflexiones sucesivas, reduciendo la cantidad de energía sonora transmitida al exterior.

Se evaluó la atenuación del encerramiento acústico antes de instalar los ventiladores y el silenciador, se registraron las lecturas de nivel sonoro promedio tanto dentro como fuera del encerramiento en condiciones de motor apagado y encendido. En la tabla 2 se observa los resultados en la reducción en la atenuación promedio, en esta parte de la evaluación no se cuenta con orificios de la ventilación ni la instalación del silenciador acústico ventilado, se observa una atenuación promedio del ruido ambiental del exterior al interior de 24.85 dB(A) cuando esta apagado el motor, y una atenuación de 23.45 dB(A) cuando esta encendida la esmeriladora del interior al exterior.

***Tabla 2**. Datos de presión sonora en el encerramiento acústico.*

Condición del sonómetro	Estado del motor	Nivel de ruido promedio dB(A)
Dentro del encerramiento cerrado	Motor apagado	40.68
Dentro del encerramiento cerrado	Motor encendido	109.63
Fuera del encerramiento	Motor apagado	65.53
Fuera del encerramiento	Motor encendido	86.18

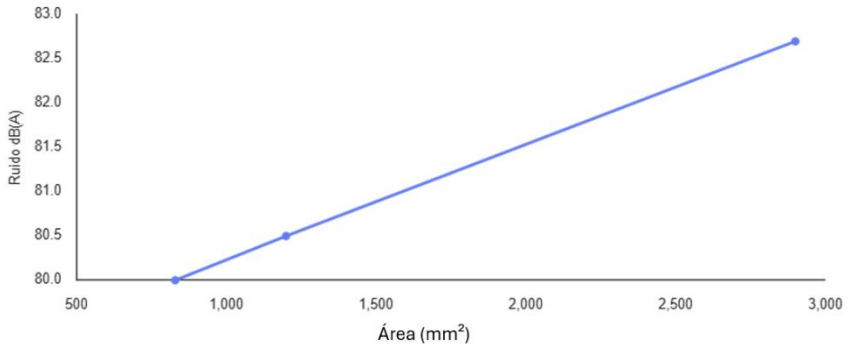
Posteriormente, se instaló el silenciador acústico ventilado y los ventiladores, se evaluaron tres áreas efectivas de apertura de salida 2900 mm^2, 1200 mm^2 y 830 mm^2, el área se calculó a partir de la modificación de diámetro en el centro impreso en 3D del silenciador acústico. En el interior del encerramiento acústico el sonómetro registra una presión sonora de 109 dB(A), el termopar una temperatura de funcionamiento estable de 45 °C y la temperatura ambiente a 27 °C cuando la esmeriladora esta encendida y está abierta la tapa del encerramiento acústico. En la tabla 3 se muestran los resultados del área de ventilación donde pasa el flujo

de aire, la temperatura y la atenuación de la presión sonora medido en dB(A), mostrando que al ir reduciendo el área por donde para el flujo de aire también se reduce el ruido, pero la temperatura se eleva, Los valores de nivel sonoro corresponden al promedio de tres mediciones ± desviación estándar.

Tabla 3. *Resultados de ruido, flujo de aire y la temperatura de acuerdo con el área.*

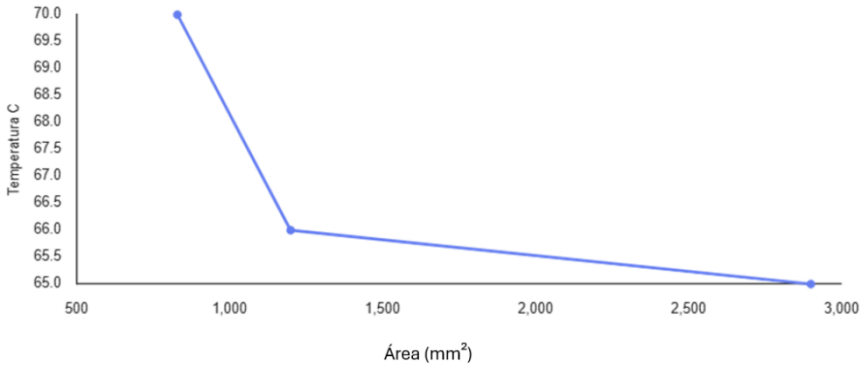
Área de ventilación (mm^2)	Ruido promedio dB(A)	Flujo de aire (m/s)	Temperatura Interna (°C)	Incremento de temperatura $\Delta T = T_{interna} - T_{ambiente}$	Pérdida por inserción IL dB
2900	82.7 ± 0.8	2.7	65	38	26.3
1200	80.5 ± 0.5	2.4	66	39	28.5
830	80.0 ± 0.6	1.6	70	43	29.0

Los resultados muestran una relación de compromiso entre la atenuación acústica y el área de ventilación donde el centro del silenciador restringe la velocidad del flujo de aire, en la gráfica 1 se observa que entre menor es el área de ventilación la atenuación tiende a aumentar, al reducir el área de ventilación de 2900 mm^2 a 830 mm^2 la atenuación acústica aumenta de 26.3 dB(A) a 29 dB(A).



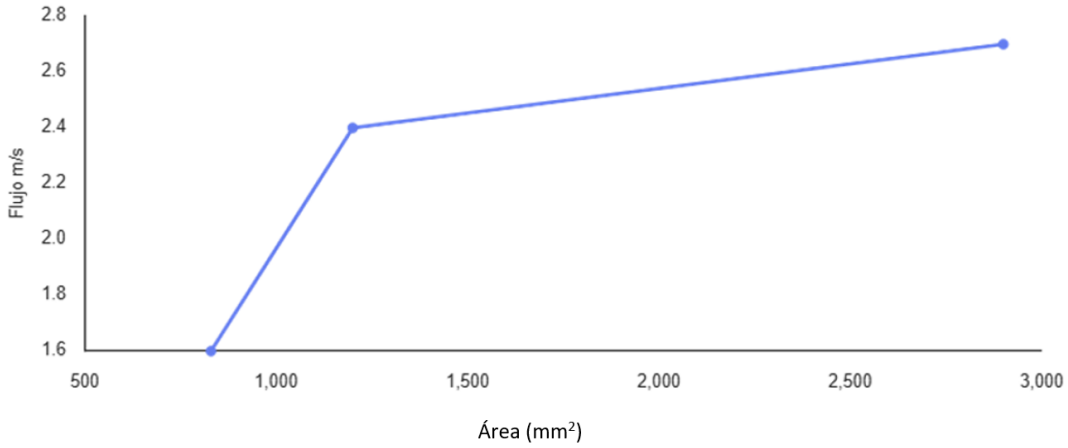
Gráfica 1. Ruido promedio (dB(A)) en comparación con área de ventilación (mm^2).

Los resultados muestran una relación de compromiso entre la temperatura y el área de ventilación del silenciador acústico ventilado que restringe la velocidad del flujo de salida del aire, en la gráfica 2 se observa que entre menor es el área de apertura del silenciador la temperatura tiende a incrementarse. Esta misma restricción reduce la velocidad del aire de 2.7 m/s a 1.6 m/s, incrementando la temperatura interna de 65 °C a 70 °C.



Gráfica 2. Temperatura interna (°C) en comparación con área de ventilación (mm^2).

Los resultados muestran una relación de compromiso entre el flujo de aire y el área de ventilación, en la gráfica 3 se observa que entre menor es el área de ventilación en el silenciador el flujo de aire tiende a disminuirse, esta misma restricción reduce la velocidad del aire de 2.7 m/s a 1.6 m/s, incrementando la temperatura interna de 65 °C a 70 °C.



Gráfica 3. Flujo de aire (m/s) en comparación con área de ventilación (mm^2).

Conclusiones

Desde una perspectiva de diseño, los resultados muestran un compromiso entre desempeño acústico y desempeño térmico. La configuración de 830 mm² proporcionó una atenuación acústica de 29 dB(A), pero presentó la temperatura interna más elevada de 70°C. Por otro lado, la configuración de 2900 mm² favoreció la ventilación y el enfriamiento, aunque con menor capacidad de reducción sonora. Bajo las condiciones evaluadas, el área de ventilación de 1200 mm² representó la mejor solución de compromiso al combinar una atenuación de 28.5 dB(A), un flujo de aire adecuado y una temperatura interna moderada.

Aunque la reducción del área de ventilación mejoró el desempeño acústico, también provocó un incremento de la temperatura interna. Este efecto se debe a que la restricción del flujo de aire disminuye la capacidad de extracción de calor generado por el motor eléctrico de la mini esmeriladora. En consecuencia, el calor permanece por mayor tiempo dentro del volumen confinado, elevando la temperatura de equilibrio térmico alcanzada por el sistema.

La disminución progresiva del flujo de aire observada al reducir el área de ventilación es consistente con el incremento de resistencia aerodinámica introducido por el silenciador. Una menor área libre de paso aumenta las pérdidas de carga asociadas al movimiento del aire, reduciendo la velocidad efectiva del flujo impulsado por los ventiladores de inyección y extracción.

El encerramiento acústico fabricado en madera de tablero OSB de espesor de 19 mm proporcionó una atenuación de 23.45 dB(A), se puede considerar un material que puede ayudar en la atenuación de ruido como se demostró en este estudio, considerando el uso de caucho para reducir las vibraciones del motor al encerramiento acústico.

Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones para el desarrollo del proyecto fue la disponibilidad de recursos económicos para la adquisición de materiales y componentes especializados. Debido a esta restricción, se optó por la reutilización de paneles de madera disponibles en el laboratorio de física, así como de ventiladores y una fuente de alimentación recuperados de equipos de cómputo fuera de servicio. Esta estrategia permitió reducir significativamente los costos de fabricación del encerramiento acústico, favoreciendo la viabilidad del proyecto dentro de las condiciones presupuestales existentes.

El presente estudio presenta algunas limitaciones metodológicas que deben considerarse en la interpretación de los resultados. La evaluación acústica se realizó mediante un sonómetro de propósito general, sin incorporar análisis espectral que permitiera identificar el comportamiento del ruido en bandas de frecuencia específicas. Asimismo, el desempeño del encerramiento acústico fue validado únicamente en una máquina herramienta, y se evaluó un número limitado de configuraciones de ventilación, lo que restringe la generalización de los resultados a otras condiciones operativas y tipos de maquinaria.

Trabajo a futuro

Debido al tiempo disponible para la ejecución del proyecto, correspondiente al periodo del Verano de la Ciencia, no fue posible realizar estudios complementarios que permitieran una caracterización más profunda del desempeño acústico y térmico del sistema. Como futuros trabajos, se pretende efectuar un análisis espectral por bandas de frecuencia, evaluar el comportamiento del encerramiento en distintos tipos de maquinaria con diferentes potencias y niveles de ruido, así como analizar un mayor número de configuraciones de ventilación y materiales absorbentes. Asimismo, sería pertinente realizar simulaciones acústicas y térmicas que permitan optimizar el diseño del silenciador y validar su desempeño en condiciones operativas más diversas, incrementando la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Bibliografía/Referencias

Beranek, L. L., & Vér, I. L. (2006). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2017). *Engineering Noise Control: Theory and Practice* (5th ed.). CRC Press.

Crocker, M. J. (2007). *Handbook of Noise and Vibration Control*. John Wiley & Sons.

ISO 15667. (2000). *Acoustics—Guidelines for noise control by enclosures and cabins*. International Organization for Standardization.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2024). Noise-induced hearing loss. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/noise/about/noise.htm

OSHA. (2024). Occupational Noise Exposure Standard, 29 CFR 1910.95. U.S. Department of Labor.