

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO SOBRE MAMPOSTERÍAS DE BLOQUES DE HORMIGÓN EN INSTALACIONES DE FAENAMIENTO ANIMAL.

Analysis of acoustic behavior on concrete block masonry in animal slaughter facilities.

	¹ Fabián Bastidas-Alarcón	fabian.bastidas@esPOCH.edu.ec
	² Lidia Castro-Cepeda*	lidia.castro@esPOCH.edu.ec
	² Andrés Noguera	andres.noguera@esPOCH.edu.ec
	² Christian Flores-Arévalo	giovanni.flores@esPOCH.edu.ec

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, GISAI, Riobamba, Ecuador.

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica, GIDETER, Riobamba, Ecuador.

E-mail: * lidia.castro@esPOCH.edu.ec

RESUMEN

Este trabajo de investigación se enfoca en las instalaciones de faenamiento animal, cuyo propósito es el sacrificio de animales para obtener carne para el consumo humano. Estas instalaciones deben cumplir con regulaciones sanitarias y acústicas debido a que el ruido generado por máquinas y animales puede ser perjudicial tanto para los trabajadores dentro de las instalaciones como para las personas que viven cerca. El estudio tiene como objetivo determinar si el hormigón puede actuar como un inhibidor acústico en este contexto. Para ello, se realiza una búsqueda bibliográfica exhaustiva relacionada con la propagación del sonido y las propiedades del hormigón, centrándose en bloques huecos fabricados con este material. Se llevan a cabo ensayos experimentales siguiendo la norma NTE INEN, donde se analizan las pérdidas de transmisión se utilizan para realizar simulaciones utilizando el software COMSOL Multiphysics. El software utiliza el modelo matemático de Johnson-Champoux-Allard, que caracteriza las propiedades acústicas del hormigón en función del ángulo de incidencia de la onda y la frecuencia, desde 0° hasta 45°. Para validar el modelo, se comparan los valores de coeficiente de absorción acústica simulados y la impedancia de la superficie con los resultados analíticos obtenidos. Con este estudio, se identifica el comportamiento acústico del hormigón en forma de bloques huecos y se obtienen los valores del coeficiente de absorción acústica a través de las simulaciones y el diseño experimental. De esta manera, se valida la aplicación de este tipo de materiales en edificaciones destinadas

a actividades de faenamiento animal, ayudando a mitigar el impacto acústico.

Palabras clave: *faenamiento animal, absorción acústica, simulación, ruido, hormigón, modelado matemático.*

ABSTRACT:

This research focuses on animal slaughter facilities, whose purpose is to sacrifice animals to obtain meat for human consumption. These facilities must comply with sanitary and acoustic regulations due to the noise generated by machines and animals, which can be harmful to both workers inside the facilities and nearby residents. The study aims to determine if concrete can act as an acoustic inhibitor in this context. For this purpose, an exhaustive literature search related to sound propagation and concrete properties is conducted, focusing on hollow blocks made of this material. Experimental tests are carried out following the NTE INEN standard, where transmission losses are analyzed and used for simulations using COMSOL Multiphysics software. The software employs the Johnson-Champoux-Allard mathematical model, characterizing the acoustic properties of concrete based on the angle of incidence of the wave and frequency, ranging from 0° to 45°. To validate the model, simulated acoustic absorption coefficient values and surface impedance are compared with analytical results. This study identifies the acoustic behavior of hollow concrete blocks and obtains acoustic

absorption coefficient values through simulations and experimental design. Thus, it validates the application of these materials in buildings dedicated to animal slaughter activities, helping to mitigate the acoustic impact.

Keywords: *acoustic absorption, simulation, noise, concrete, mathematical modelling.*

1. INTRODUCCIÓN

Los alimentos de origen animal, especialmente ovinos y porcinos, son altamente demandados en las sociedades debido a su valor nutricional. Por esta razón, a lo largo de la historia, se han establecido lugares en las ciudades con el propósito de recibir y sacrificar animales para obtener carne destinada al consumo humano.[1]

La producción de carne debe cumplir estrictos controles sanitarios y acústicos. En el aspecto sanitario, se debe evitar la contaminación del producto y proteger la salud de los consumidores y el medio ambiente. En cuanto al aspecto acústico, el ruido generado por máquinas y animales es significativo y puede afectar tanto a los trabajadores dentro de las instalaciones como a las personas que viven cerca [2]. Es esencial encontrar materiales adecuados para la construcción de estas instalaciones, y se investiga si los bloques huecos de hormigón pueden proporcionar aislamiento acústico. El objetivo es mejorar las condiciones de trabajo para el personal en los mataderos y la calidad de vida de quienes viven cerca de estas instalaciones. [3]

En los últimos años, la contaminación acústica ha sido un problema de gran importancia a nivel internacional. El ruido ambiental ha aumentado debido al crecimiento de diversas actividades económicas, sociales e industriales. En muchas ciudades pobladas, se ha registrado que los niveles de ruido superan los 65 dB(A), afectando a al menos 130 millones de personas durante el día, según la OCDE. Muchas de estas personas enfrentan niveles de contaminación acústica que exceden los límites establecidos por la OMS [4], [5], [6], [7].

El ruido, que se origina por la cantidad de sonido que generan las actividades humanas, puede representar una amenaza para la salud auditiva a largo plazo si no se controla adecuadamente. Además, puede afectar el bienestar físico y mental de las personas, dificultando mantener un estilo de vida relajado y saludable. En este contexto, encontrar soluciones para reducir el ruido contribuirá a mejorar el ambiente tanto físico como mental [5], [8], [9].

A partir de este análisis bibliográfico surge la necesidad de proporcionar soluciones constructivas que protejan a los individuos de choques acústicos, que mejoren directamente la calidad de vida y los estándares de salud auditiva [10]. Los materiales utilizados en la construcción poseen distintas propiedades, las mismas que los caracterizan y son de utilidad para su selección, tomando en cuenta su forma, resistencia, dureza, versatilidad y tamaño.

Esta investigación se enfoca en analizar el coeficiente de absorción en bloques huecos de hormigón y su capacidad como inhibidor acústico a través de simulaciones. Se destaca la falta de consideración de las propiedades acústicas y absorbentes de los materiales de construcción en el momento de iniciar una obra, lo que puede resultar en una alta contaminación sonora y excesivo ruido ambiental en industrias y zonas habitacionales. La necesidad de evaluar el comportamiento acústico de los bloques de hormigón se resalta, ya que podrían ser una solución para reducir el impacto del ruido en la población, especialmente en zonas industriales donde los niveles de ruido pueden superar los límites permisibles [11].

La investigación consta de tres fases: un análisis inicial de la problemática, una revisión bibliográfica exhaustiva para establecer antecedentes, y la obtención de resultados y su discusión, seguida de las conclusiones. Para medir los niveles sonoros, se consideran la presión, intensidad y frecuencia del sonido, lo que permite determinar su intensidad. Se utiliza el Método de Elementos Finitos (FEM) con la función de dominio poroacústica basada en el modelo matemático de Johnson-Champoux-Allard para la simulación. Esto permitirá definir cómo el hormigón actúa como inhibidor acústico y su posible uso en construcciones expuestas a altos niveles de ruido, creando ambientes estructuralmente seguros y reduciendo la contaminación acústica

1.1 Simulación y comportamiento de ondas sonoras en materiales de construcción.

Los investigadores buscan mejorar las propiedades acústicas de los materiales de construcción para crear espacios con mejores condiciones de vida en zonas con altos niveles de ruido. Para lograrlo, se identifican las propiedades acústicas y se realiza un modelado matemático de las cargas acústicas de exposición. La atenuación del material dependerá de su porosidad y volumen. Se analiza la geometría de los poros y se considera la posibilidad de utilizar aditivos para mejorar la dispersión y atenuación de las ondas acústicas [12].

El hormigón es un material ampliamente utilizado en la construcción y es crucial considerar tanto su diseño estructural como sus propiedades acústicas. Estas características permiten crear espacios habitables cómodos y mejorar el confort de las personas. Los hormigones con diferentes composiciones tienen distintos comportamientos como conductores del sonido, siendo las mezclas densas reflectoras de sonido y las ligeras absorbentes. La reflexión del sonido en el hormigón depende de los agregados y de los cambios en el diseño de la mezcla. Para mejorar la absorción acústica del hormigón con aislamiento acústico (AIC), se pueden hacer cambios en su configuración y agregar elementos porosos o agentes de espuma [13], [14].

En su investigación, Pereira introduce el concepto de "hormigón meta poroso", un absorbente de sonido que consiste en hormigón poroso con resonadores acústicos incorporados. Se implementan dos modelos de elementos finitos con la teoría de fluido equivalente para describir las soluciones del hormigón meta poroso. Mediante un Resonador de Helmholtz y técnicas de tubo de impedancia, se realizan pruebas experimentales en muestras de hormigón poroso y probetas de hormigón para obtener las propiedades del fluido equivalente y validarlas con datos experimentales y predicciones analíticas. Los modelos numéricos y la metodología utilizada permiten predecir la absorción acústica en el hormigón meta poroso, lo que lo convierte en un material útil para el control del ruido en construcciones civiles exteriores [15].

1.2 Comportamiento de las ondas como inhibidores acústicos

En la búsqueda de soluciones para problemas de resonancia acústica, se han empleado diversas estrategias, como la colocación de elementos absorbentes en las esquinas de salas y el diseño de resonadores de Helmholtz. La eficiencia de estas estrategias depende de la gestión de las bandas de frecuencia [16]. Investigaciones recientes se han enfocado en el uso de láminas perforadas de cerámica, basadas en el principio de resonadores de Helmholtz, para lograr una absorción acústica efectiva en bandas de frecuencia estrechas. Estas láminas son perforadas y montadas en una superficie rígida. Para medir el coeficiente de absorción acústica a incidencia normal, se utiliza un tubo de impedancia o tubo de Kundt con ciertas dimensiones específicas. Las investigaciones también han abordado el problema de las zonas de atenuación con diferentes frecuencias en materiales, particularmente en losas perforadas con diferentes configuraciones geométricas. Utilizando el software de elementos finitos ANSYS, se han analizado las ondas de

flexión y las propiedades de la zona de atenuación en losas con perforaciones en forma de cruz, cuadrados y agujeros en forma de diamante. Para analizar el comportamiento acústico de las muestras, se emplea un método numérico y se desarrolla un código para simular la estructura en 3D. Se calculan la tortuosidad y dos longitudes características en un software numérico y se utiliza el modelo Johnson-Champoux-Allard (JCA) para predecir los coeficientes de absorción acústica en diferentes frecuencias. Los resultados muestran el comportamiento acústico de los paneles acústicos optimizados en términos de tiempo de reverberación y coeficiente de absorción aleatoria en una sala de reverberación [16], [17], [18], [19].

1.3 Métodos de simulación numérica de propagación de ondas

En las investigaciones actuales se utilizan los modelos matemáticos, que tienen como objetivo principal el de caracterizar el campo sonoro y esquematizar la réplica impulsiva del recinto formándose en una herramienta muy valiosa para el diseño y análisis acústico. Según Cravero, en su estudio presenta resultados de mediciones de tiempo de reverberación y propiedades acústicas en aulas mediante el método de la respuesta integrada según IRAM 4109-2. Como siguiente paso se comparan los valores medidos con los simulados mediante herramientas de cálculo computacional. Finalmente, en el análisis de resultados contrasta las mediciones con la recomendación dada en la norma ANSI S12.60 y referencias bibliográficas a nivel internacional [20]. Otro modelo matemático para el análisis vibro acústico de una estructura de 17 pisos, muestra una buena correlación con los resultados de los datos medidos. Se debe considerar que para la selección de un método numérico depende del dominio de frecuencia, para un dominio de baja frecuencia se prefiere el FEM o el método de elementos de contorno (BEM). Cabe señalar que se considera el FEM para las simulaciones computacionales ya que la investigación se limita a regiones de baja frecuencia [21].

Uno de los métodos numéricos más utilizados para análisis de porosidad y absorbentes es el modelo Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL), aplicado para calcular los cinco parámetros de transporte del modelo JCAL, en los que se incluyen la permeabilidad viscosa, permeabilidad térmica, tortuosidad, longitud característica viscosa y longitud característica térmica. Estos valores permiten modelar los tubos rugosos en el material poroso, como tubos rugosos paralelos que tienen morfologías sinusoidales idealizadas.

Finalmente, los resultados han evidenciado que la existencia de la rugosidad en los tubos debilita el efecto térmico, pero refuerza drásticamente el efecto viscoso en la disipación de la energía del sonido, lo que resulta en el mejoramiento de absorción del sonido [22].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Equipos y materiales

2.1.1 Bloques huecos de hormigón

La norma usada para la fabricación de los bloques huecos de hormigón es: Bloques Huecos de hormigón. Definiciones, Clasificaciones y Condiciones. En la Tabla 1, se indica los tipos de bloques huecos existentes en el mercado y sus dimensiones, para este estudio se ha seleccionado al bloque de hormigón tipo B [23].

Tipo de bloque	DIMENSIONES NOMINALES			DIMENSIONES REALES			USOS
	largo	ancho	alto	largo	ancho	alto	
A, B	40	20 15 10	20	39	19 14 09	19	Paredes exteriores de carga, sin revestimiento. Paredes exteriores de carga, con revestimiento Paredes interiores de carga, con o sin revestimiento
C, D	40	10 15 20	20	39	09 14 19	19	Paredes divisorias exteriores sin revestimiento. Paredes divisorias exteriores, con revestimiento. Paredes divisorias interiores, con o sin revestimiento.
E	40	10 15 20 25	20	39	09 14 19 24	20	Losas alivianadas de hormigón armado

Tabla 1. Tipos de bloques huecos de hormigón y sus usos.

Fuente: Norma NTE-INEN [24] [23]

Las dimensiones del bloque que se va a utilizar son las siguientes, largo = 40 cm, ancho = 15 cm, altura = 19 cm y un peso aproximado de 8.5 kg como se muestra en la Figura 1, la normativa menciona que los bloques deben tener dimensiones uniformes, aunque no debe tener una variación de sus longitudes mayor a 5 mm [23].

2.1.2 Normas para la realización de los ensayos

En la Tabla 2 se detallan las normas a ser aplicadas en la fase experimental, para la realización de ensayos como: densidad, porosidad y resistencia mecánica, en los ladrillos y bloques de hormigón, parámetros necesarios para la realización de las simulaciones acústicas.

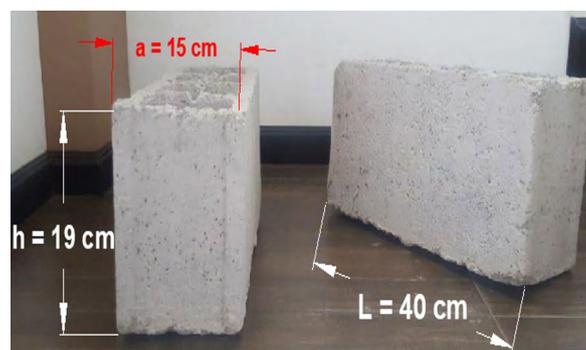


Figura 1. Longitudes muestras de bloques huecos de hormigón.

Ensayo	Norma utilizada	Parámetros
Densidad	Materiales Refractarios. Determinación De La Porosidad, absorción De Agua Y Densidad Aparente. NTE INEN 857:2010. Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo. NTE INEN 3066-2016	Densidad de las probetas
Porosidad	Materiales Refractarios. Determinación De La Porosidad, absorción De Agua Y Densidad Aparente. NTE INEN 573. Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo. NTE INEN 3066-2016	Porcentaje de porosidad total
Resistencia mecánica	Ladrillos Cerámicos. Parte 5: Métodos De Ensayo. NTE INEN 3049 Parte 5:2019. Bloques huecos de Hormigón, unidades relacionadas y prismas para mampostería. Refrentado para el ensayo de compresión. NTE INEN 2619:2012	Esfuerzo

Tabla 2. Normas NTE INEN usadas para la realización de los ensayos

Fuente: Normas NTE INEN [25][26], [27][28], [29][30], [31][32], [33]

2.1.3 Software Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics, es un software que se presenta un entorno eficaz de simulación utilizado para modelar y resolver problemas científicos y de ingeniería. Este software utiliza el FEM y ecuaciones diferenciales parciales. La interfaz se puede observar en la Figura 2. [34][35].

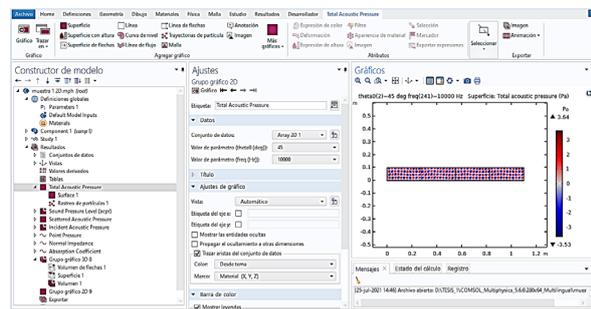


Figura 2. Interfaz COMSOL Multiphysics

Fuente: [36] [34]

2.1.4 Cálculo del Módulo de Young

El módulo de elasticidad es la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria, si el esfuerzo considerado es una tensión o una compresión el módulo se denomina de Young [37]. Para los bloques huecos de hormigón analizados se realizaron ensayos a compresión, donde se recolectaron datos del último esfuerzo aplicado y la deformación, la Ecuación 1 permite el cálculo. Donde, E representa el Módulo de Young, σ es la tensión o fuerza uniaxiales por unidad de superficie y ϵ es la deformación. El valor de la deformación (ϵ) se muestra en la Ecuación 2, donde ΔL variación de longitud y L es

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

2.1.5 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido es aquella que se propaga mediante una onda sonora a través de un medio material, como el aire, el agua o un sólido. La velocidad del sonido depende de las propiedades del medio a través del cual se propaga y de la temperatura de ese medio. La expresión utilizada en el análisis de las muestras de hormigón y está en función del Módulo de Young E y de la densidad p , como resultado se tiene la Ecuación 3.

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (3)$$

2.1.6 Impedancia acústica

La impedancia acústica como una propiedad que brinda información sobre el medio y el tipo de onda que se va a propagar, este cálculo de gran importancia involucra la transmisión de ondas acústicas de un medio a otro [38]. La siguiente expresión permite calcular la impedancia acústica (Z). Donde, p es la presión acústica y v la velocidad asociada a las partículas oscilantes en un medio.

$$Z = \frac{p}{v} \quad (4)$$

2.1.7 Cálculo del coeficiente de absorción en COMSOL Multiphysics

El coeficiente de absorción acústica se refiere a la capacidad que poseen todos los materiales para mitigar la propagación de las ondas de sonido cuando éstas inciden sobre ellos, por esto se debe considerar las bandas de octava, debido a que el oído humano escucha de manera logarítmica, y las frecuencias se dividen de esta forma, a esto se le conoce como octavas,

[39], donde una octava se define como el intervalo que separa a una frecuencia de otra de manera doble. Según la norma NTE INEN 266 [40], que se indica la Tabla 3, que indica los valores de octavas más utilizados.

Frecuencias centrales de las bandas de octava										
16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Tabla 3. Bandas de octava más utilizadas en Hz.

Fuente: Norma NTE INEN 266[40]

En esta investigación, la propiedad será calculada mediante simulaciones del comportamiento acústico en el software Comsol Multiphysics, y se ha considerado que para mayor precisión y resolución del fenómeno la frecuencia desarrollada se dará en tercios de octava. Para lo cual se ha tomado como modelo de referencia el Porous Absorber, uno de los modelos en función del dominio Poro acústicos de la interfaz de presión acústica, descritos en la Guía del usuario del Módulo de Acústica, [41], que utiliza el modelo Johnson-Champoux-Allard como solucionador numérico para la caracterización de las propiedades de absorción de un ladrillo común en términos del ángulo de incidencia del sonido y frecuencia, [42].

De manera general este modelo analiza matrices porosas Johnson-Champoux-Allard (JCA), está definido por la densidad rígida equivalente $Prig(\omega)$ y el módulo volumétrico equivalente $K\omega$, a continuación, se describen sus expresiones matemáticas. Donde: T_∞ = factor de tortuosidad (límite de alta frecuencia), p_f = densidad del fluido, ϵ_p = porosidad, R_f = resistividad del flujo, μ = viscosidad dinámica, P_A = presión inactiva, γ = relación de calores específicos, L_v = longitud característica viscosa, P_{th} = longitud característica térmica, Pr = número de Prandtl [41]:

$$Prig = \frac{T_\infty p_f}{\epsilon_p} \left[1 + \frac{R_f \epsilon_p}{i \omega p_f T_\infty} \sqrt{1 + \frac{4 \omega T_\infty^2 \mu p_f}{R_f^2 L_v^2 \epsilon_p^2}} \right] \quad (5)$$

$$K = \frac{\gamma P_A}{\epsilon_p} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8 \mu}{i \omega L_{th}^2 Pr p_f} \sqrt{1 + \frac{i \omega L_{th}^2 Pr p_f}{16 \mu}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

2.1.8 Ensayos para cálculo de propiedades de los bloques.

Los ensayos realizados permitirán obtener datos por medio de experimentación que permiten su validación con los parámetros encontrados, para finalmente evaluar su comportamiento mediante la ejecución de las simulaciones en software especializado se describen a continuación:

Densidad y Absorción del bloque:

Este ensayo se realiza bajo la Norma NTE INEN 3066:2016-11 [32], Bloques de Hormigón. Requisitos y Métodos de Ensayo, Absorción, Densidad y otros. El cual permite determinar la densidad de las muestras, los pasos necesarios para su ejecución se describen a continuación,[31]:

- Se deben considerar 3 muestras completas para los ensayos sin defectos.
- Se necesitará de una balanza con una exactitud de $\pm 1g$ de masa.

Para el procedimiento de saturación se deben sumergir las muestras a una temperatura entre $16^\circ C$ y $27^\circ C$, durante un tiempo de 24 a 28 horas, en un recipiente que permita cubrirlas totalmente y registrar este valor como M_s .

A continuación, se debe sacar las muestras del agua y dejarlas escurrir durante 60 s, sobre una malla metálica, y secarlas con un paño húmedo, determinar la masa y registrarlo. Repetir el procedimiento cada 24 horas hasta que la diferencia en el pesaje sea inferior al 0.2 %. Registrar el resultado como M_s (masa de la muestra saturada). Secar las muestras en un horno ventilado, entre $100^\circ C$ y $115^\circ C$, realizar las mediciones de peso cada 24 horas, hasta que la diferencia de peso sea inferior al 0.2 %. Se debe registrar este valor como M_d (Masa de la muestra seca al horno).



Figura 3. Muestras de bloques sumergidas en agua, para el cálculo de la densidad y porcentaje de absorción.

Las ecuaciones para el cálculo de la densidad y la absorción según la norma [31], en bloques de hormigón se detallan a continuación:

Absorción:

$$Absorción = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_i} \times 1000 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (7)$$

$$Absorción = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

Densidad:

$$\text{Densidad} = \frac{M_d}{M_s - M_i} \times 1000 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (9)$$

Donde, M_s masa de la unidad saturada, M_i masa de la unidad sumergida, M_d masa de la unidad seca al horno, las unidades están dadas en [kg].

- **Ensayos resistencia mecánica: Ensayo de compresión para el bloque hueco de hormigón.**

Para realizar este ensayo se consideran las recomendaciones Norma NTE INEN 640. Bloques huecos de hormigón. Determinación de la Resistencia a la compresión, que indica los siguientes pasos, [43]:

- Utilizar bloques enteros seleccionados de acuerdo con la norma INEN 639 [32].
- Los bloques deben ser sumergidos en agua por un periodo de 24 horas y luego recubiertos con mortero de cemento-arena con una capa no mayor a 6 mm de espesor, para que las superficies ensayadas sean regulares y paralelas.

Para ensayar las muestras, estas deben ser colocadas con respecto al centro de la rótula de aplicación de la carga. La aplicación de la carga será gradual, en un tiempo no menor a 1 min ni mayor a dos, considerando una velocidad constante.

- **Simulación del comportamiento acústico en Comsol Multiphysics V. 5.6, de las muestras bloques (B1, B2).**

Para la realización de las simulaciones se tomó como referencia el modelo de absorción acústica mediante una espuma acústica de celda abierta porosa (Porous Absorber), de donde se describen las instrucciones de modelado. [43].

- **Variables respuesta o resultados alcanzados**

La investigación se centra en la transmisión de ondas sonoras en materiales de construcción y sus propiedades acústicas, como absorción, transmisión y reflexión del sonido. El objetivo es determinar el coeficiente de absorción acústica para bloques huecos de hormigón mediante simulaciones en el software COMSOL Multiphysics. Se caracterizarán las propiedades de absorción en términos del ángulo de incidencia del sonido y la frecuencia. Los resultados del modelo serán comparados con datos analíticos para determinar si el ladrillo tradicional y el bloque hueco de hormigón cumplen con los requisitos para ser considerados como inhibidores acústicos.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados obtenidos de ensayos

3.1.1 Bloques huecos de hormigón

Los bloques huecos de hormigón tienen una gran presencia en construcciones por su gran maniobrabilidad, los seleccionados para este estudio siguen la siguiente norma de construcción [24]. Bloques Huecos de hormigón. Definiciones, Clasificaciones y Condiciones. Las dimensiones y tipo de bloque usado en los ensayos y simulaciones se indican en la Tabla 4.

DIMENSIONES NOMINALES				DIMENSIONES REALES		
Tipo de bloque	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto
A, B	40	20,15,10	20	39	19,14,09	19

Tabla 4. Tipo y dimensiones de bloques huecos de hormigón en cm.

Fuente: Elaborado por autor, según Norma NTE INEN [24]

Para el cálculo de la densidad en las muestras de bloques se considera la norma NTE INEN 3066-2016, Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo, Anexo D (normativo) Absorción, Densidad y otros. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Muestras	Masas [kg]			Densidad [kg/m ³]
	Masa de la unidad saturada [Ms]	Masa de la unidad seca al horno [Md]	Masa de la unidad sumergida [Mi]	
B1	10.05	8.21	10.01	205205
B2	10.00	8.43	9.96	210750

Tabla 5. Valores de densidad muestras de bloques huecos de hormigón.

3.1.2 Ensayo de Porosidad

Para el cálculo de la absorción se considera la norma NTE INEN 3066-2016, Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo, ANEXO D (normativo) Absorción, Densidad y otros. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Muestras	Masas [kg]			Absorción [%]
	Masa de la unidad saturada [Ms]	Masa de la unidad seca al horno [Md]	Masa de la unidad sumergida [Mi]	
B1	10.05	8.21	10.01	22.41
B2	10.00	8.43	9.96	18.62

Tabla 6. Valores de absorción total [%]

3.1.3 Ensayos resistencia mecánica

En los bloques huecos de hormigón el ensayo de resistencia mecánica que se recomienda es el dado por la norma NTE INEN 2619:2012 Bloques huecos de Hormigón, unidades relacionadas y prismas para mampostería. Refrentado para el ensayo de compresión. La Tabla 7 indica los resultados obtenidos en el ensayo de compresión sobre los bloques.

Muestras	Probeta	Esfuerzo (σ)	Deformación (ϵ)
		[N/m ²]	[mm]
B1	1	225356.22	2.33
	2	174451.25	1.39
	3	157371.48	1.63
Promedio		185726.31	1.78
B2	1	226371.64	1.08
	2	197663.65	1.62
	3	166402.81	1.55
Promedio		196812.70	1.42

Tabla 7. Resultados ensayo de compresión (Esfuerzo y deformación)

Los valores obtenidos del módulo de Young y la velocidad del sonido para los bloques huecos de hormigón, se observan en la Tabla 8, estos parámetros son necesarios en la realización de las simulaciones.

Muestras	Módulo de Young	Velocidad sonido (c)
	[Pa]	[m/s]
B1	104145.59	0.71
B2	138926.61	0.81

Tabla 8. valores Modulo de Young y velocidad del sonido

3.1.4 Resultados de la simulación en COMSOL Multiphysics para la obtención del coeficiente de absorción acústica (α)

Los resultados se obtuvieron mediante simulaciones de muestras en bloques huecos de hormigón (B1 y B2). La simulación consideró un rango de frecuencias de 10 Hz a 10 KHz, con una incidencia angular de la onda de 0° a 45°. Se generaron gráficas de presión sonora vs frecuencia, impedancia vs frecuencia y coeficiente de absorción vs frecuencia en 2D, aplicadas a la cara principal del bloque. También se realizaron simulaciones en 3D para verificar la incidencia de la onda acústica sobre el material de construcción, obteniendo resultados adicionales.

- Resultados de la simulación 2D y 3D de las muestras de bloques huecos de hormigón B1 y B2

Simulaciones en muestra de bloque B1 en 3D

La simulación 3D de la muestra de bloque hueco de hormigón B1, se observa en la Figura 4, en donde la incidencia de la onda a 45°, con una frecuencia propia de 99.986 Hz, dando como resultado valores máximos de presión acústica (en color rojo) desde 2 a 4 [Pa], considerar que estos valores de concentración de presión se presentan en las caras del bloque donde existe mayor incidencia acústica. Además, se muestra el cuerpo estudiado en el plano YZ que permite identificar de mejor manera la incidencia de la presión sonora sobre la muestra simulada.

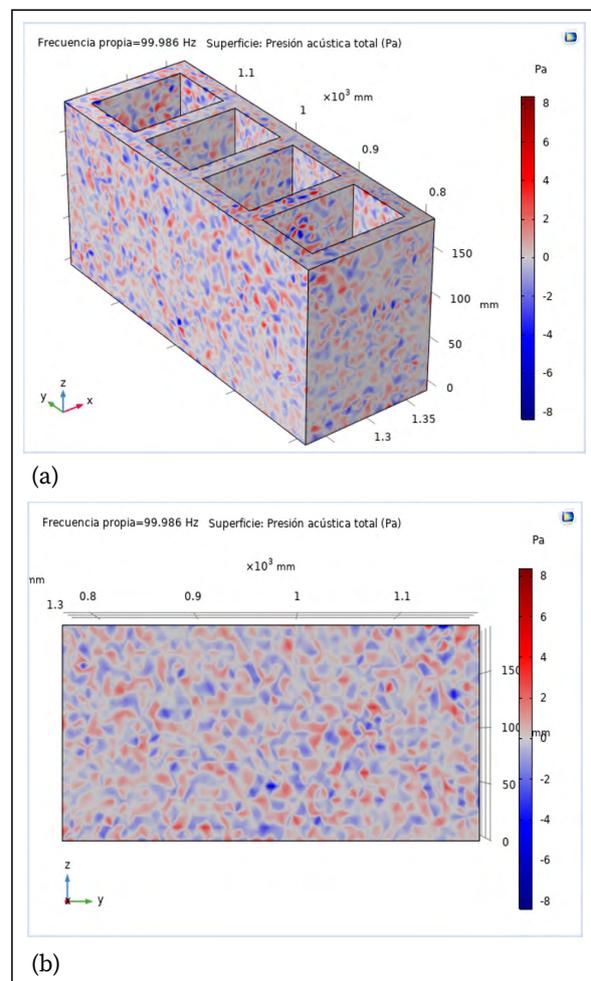


Figura 4. (a) Simulación de la Muestra B1. (b) Muestra B1 en el plano YZ.

La distribución del nivel de presión sonora sobre la muestra B1, se observa en la Figura 5, resultado de la simulación 3D, donde la frecuencia propia que tiene un valor de 99.989 Hz incide sobre las caras de

la muestra B1, generando valores de nivel de presión sonora sobre los huecos del bloque entre los 90 a 100 dB, es importante mencionar zonas de color amarillo en la totalidad de la muestra simulada con un valor aproximado de 70 dB. Estos valores pueden ir variando principalmente por la velocidad del sonido incidente sobre el material. La zona amarilla de la muestra se puede observar de mejor forma en el plano XZ.

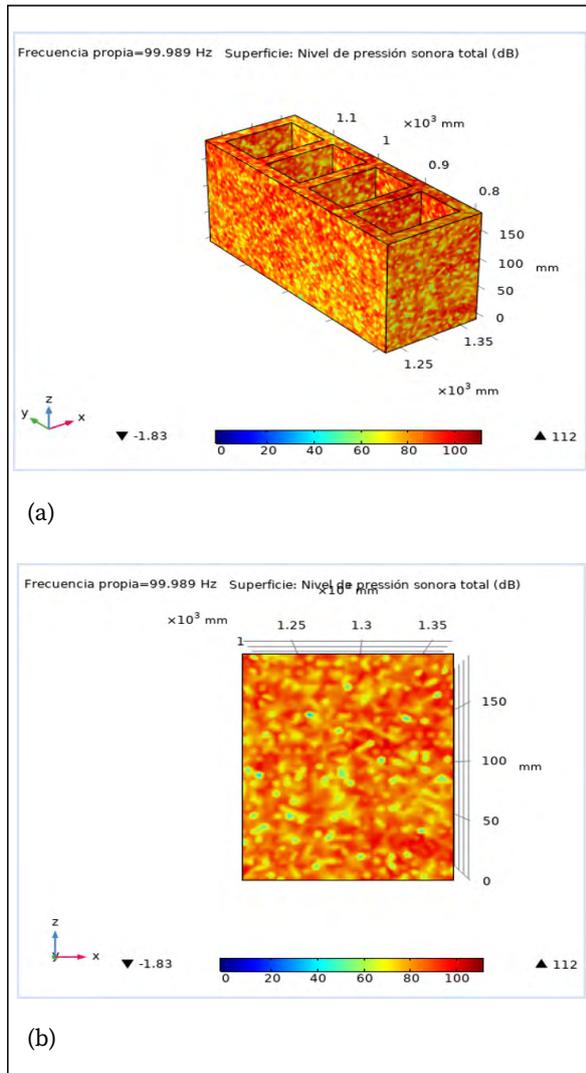


Figura 5. (a) Distribución del nivel de presión sonora sobre la muestra B1. (b) Distribución del nivel de presión sonora en el plano XZ.

Para obtener mejores resultados de nivel presión sonora en la simulación de la muestra B1, se procede a refinar la malla, con un valor de frecuencia propia de 99,996 Hz. Como se puede observar en la barra de colores de la Figura 4-13, estos valores están entre 85 a 100 dB, además se ve una trama diferente de la incidencia de la onda acústica sobre el bloque, estas imágenes se han producido principalmente por el número de elementos

que tiene la malla después del refinamiento, ayudando a la convergencia en la simulación.

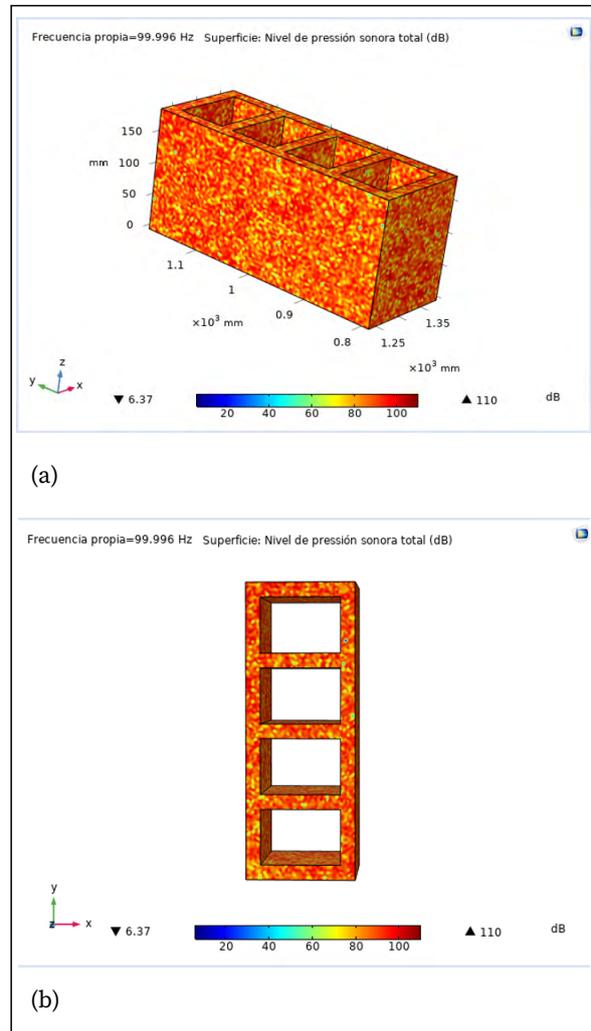


Figura 6. (a) Simulación de la Muestra B1 con malla refinada. (b) Muestra B1 en el plano XY con refinamiento de malla.

Simulaciones en 2D

La muestra B1 simulada en 2D permite los siguientes resultados:

Presión sonora vs la Frecuencia

En la Figura 7 se representa la presión sonora donde se relaciona la frecuencia [Hz] y la presión acústica total [Pa] considerando la incidencia de la onda, para lo cual se han analizado dos ángulos incidentes $(\theta) = 0^\circ$ y $(\theta) = 45^\circ$. El ángulo incidente (AI) $(\theta) = 45^\circ$ presenta un comportamiento irregular en comparación a la curva que describe el ángulo incidente (AI) $(\theta) = 0^\circ$, además como resultado se tiene un valor máximo de 4.83 [Pa] de presión acústica total con una frecuencia de 250

Hz. Estos valores obtenidos se encuentran dentro de la norma que el oído humano recepta y tolera que va desde los 20 a los 20000 Hz, la simulación ha permitido demostrar que el bloque si funciona como un inhibidor de sonido.

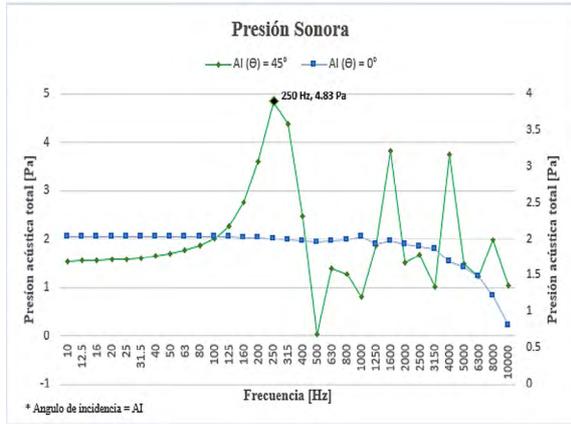


Figura 7. Presión acústica total vs Frecuencia en la muestra B1.

Impedancia vs Frecuencia

Al ser la impedancia una propiedad importante que relaciona la presión acústica y la velocidad con la que las partículas oscilantes se desarrollan en un medio, en una frecuencia determinada, la Figura 8, permite identificar estos valores, para lo cual se ha considerado la onda generada por el ángulo de incidencia $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica. (curva color negro), donde se observa que la impedancia decrece a medida que la frecuencia aumenta. Se tiene un valor de $Z = 21.63$ (adimensional) en una frecuencia de 10 Hz, este valor permanece estable, hasta un valor de $Z = 21.05$ en la frecuencia de 40 Hz, por tanto, se puede concluir que la velocidad de las partículas irá disminuyendo cuando la frecuencia aumente.

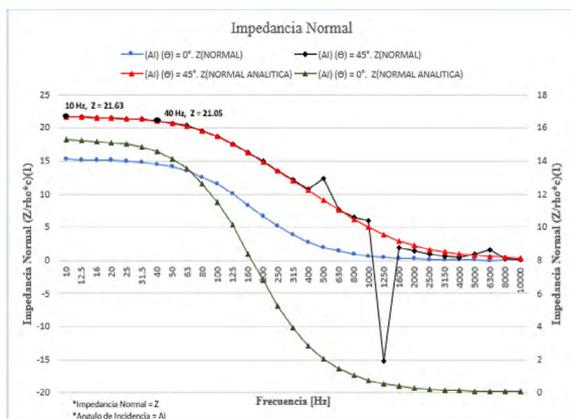


Figura 8. Impedancia Normal de la muestra B1, con los diferentes ángulos de incidencia: Angulo incidente (AI) $(\theta) = 45^\circ$; Angulo incidente (AI) $(\theta) = 0^\circ$; (AI) $(\theta) = 0^\circ$.

ZNORMAL Impedancia normal de superficie específica; (AI) $(\theta) = 0^\circ$. ZNORMAL ANALITICA Impedancia normal de superficie específica (analítica); (AI) $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica; (AI) $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica (analítica).

Coefficiente de absorción vs Frecuencia

La Figura 9 presenta los resultados de la simulación 2D en referencia al coeficiente de absorción $[\alpha]$ de la muestra B1, donde se puede identificar los valores del coeficiente en la curva para el coeficiente de absorción con incidencia a 45° ((AI) $(\theta) = 45^\circ$ α) un valor máximo $\alpha = 0.97$, $f = 1.0$ KHz, y de $\alpha = 0.29$, $f = 10$ KHz, que corresponde a la linealización del ángulo de incidencia a 45° (curva analítica para el coeficiente de absorción con incidencia a 45° . (AI) $(\theta) = 45^\circ$. (α analítica)), esta diferencia entre estos valores se da por la irregularidad de la curva a 45° a partir de los 630 Hz, además del valor de la velocidad del sonido y la densidad del material propiedades de gran importancia en las simulaciones.

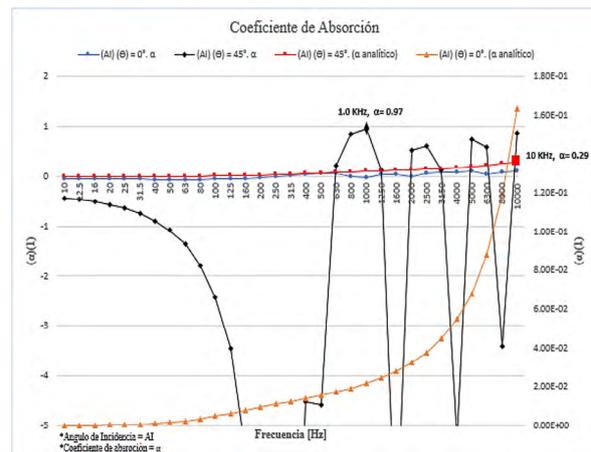


Figura 9. Coeficiente de absorción vs Frecuencia con los diferentes ángulos de incidencia: (AI) $(\theta) = 0^\circ$. α , (AI) $(\theta) = 0^\circ$. (α analítica); (AI) $(\theta) = 45^\circ$. α ; (AI) $(\theta) = 45^\circ$. (α analítica).

Simulaciones en muestra de bloque B2 en 3D

En la Figura 10 se presenta el resultado de la simulación en 3D de la segunda muestra de bloque hueco de hormigón (B2), en donde se observa la incidencia de la onda a 45° , con una frecuencia propia de 99.987 Hz, se pueden notar variaciones de presión que producen áreas de mayor concentración de partículas (áreas de color rojo) en las diferentes caras del material de construcción y valores que están entre los 2 a 6 [Pa]. Además, se ha considerado al plano XZ para el estudio que permite identificar de mejor manera la incidencia de la presión sonora sobre la muestra simulada.

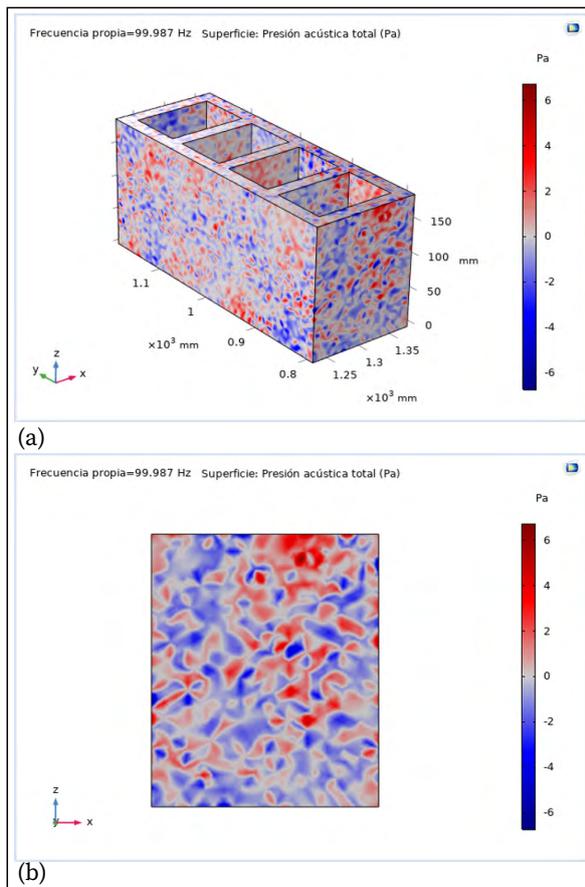


Figura 10. (a) Simulación de la Muestra B2. (b) Muestra M2 en el plano YZ.

La distribución del nivel de presión sonora sobre la muestra B2, se observa en la Figura 4-18, resultado de la simulación 3D, donde la frecuencia propia que tiene un valor de 99.991 Hz incide sobre las caras del bloque, generando valores de nivel de presión sonora entre los 90 a 100 dB, (zonas de concentración de color rojo). Es importante mencionar zonas de color amarillo que están presentes en la totalidad del bloque que se repite simultáneamente en función del tiempo (frecuencia) con un valor aproximado de 70 dB. La zona amarilla de la muestra se puede observar de mejor forma en el plano XZ.

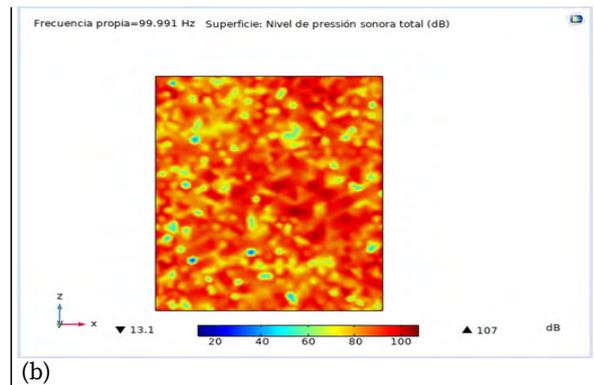
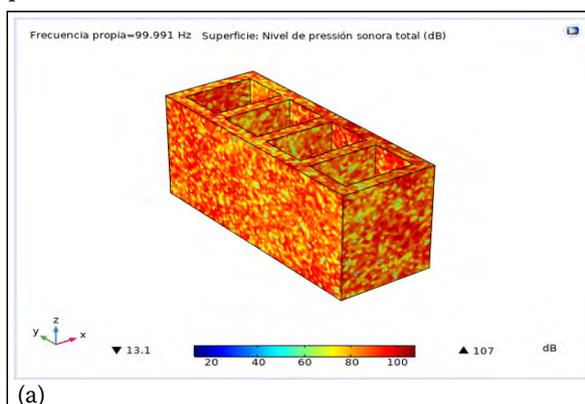


Figura 11. (a) Distribución del nivel de presión sonora sobre la muestra B2. (b) Distribución del nivel de presión sonora en el plano XZ.

El refinamiento de la malla permite observar los resultados de nivel presión sonora en la simulación de la muestra B2, con un valor de frecuencia propia de 99,995 Hz. Los valores de máxima concentración están entre 90 a 100 dB que se muestran en la barra de colores, además en la Figura 12 se ve una trama diferente de la incidencia de la onda acústica sobre el bloque, esto va a depender del valor de la velocidad del sonido que para esta muestra está en 0.81 m/s; cabe mencionar que estas imágenes se han producido principalmente por el número de elementos que tiene la malla después del refinamiento.

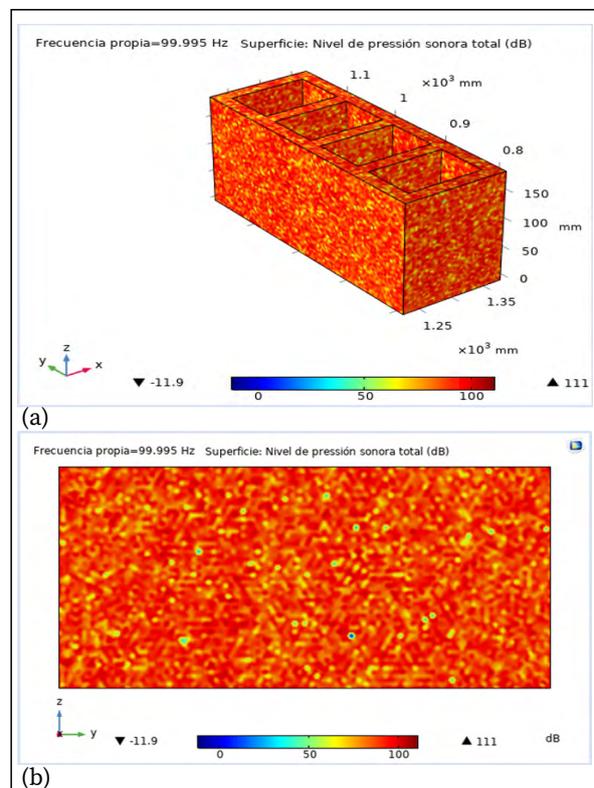


Figura 12. a) Resultados del nivel de presión sonora en la simulación de la muestra B2 con malla refinada. (b) Muestra B2 en el plano XZ con refinamiento de malla.

Simulaciones en 2D
Presión sonora vs la Frecuencia

La Figura 13 presenta la presión sonora considerando dos ángulos incidentes $(\theta) = 0^\circ$ y $(\theta) = 45^\circ$. El ángulo incidente (AI) $(\theta) = 45^\circ$ (curva color verde) presenta un comportamiento irregular en comparación a la curva que describe el ángulo incidente (AI) $(\theta) = 0^\circ$, además como resultado se tiene un valor máximo de 4.861 [Pa] de presión acústica total con una frecuencia de 250 Hz. Estos valores variarán según la velocidad del sonido que se tenga.

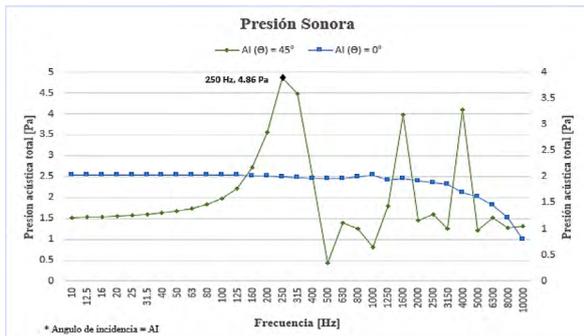


Figura 13. Presión acústica total vs Frecuencia en la muestra B2.

Impedancia vs Frecuencia

La Figura 14 muestra los valores de la impedancia, esta propiedad relaciona la presión acústica, la velocidad y la frecuencia con la que las partículas oscilantes se desarrollan en un medio, se ha considerado la onda generada por el ángulo de incidencia $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica. (curva color negro), donde se observa que la impedancia decrece a medida que la frecuencia aumenta. Se tiene un valor de $Z = 21.63$ (adimensional) en una frecuencia de 10 Hz, este valor permanece estable, hasta un valor de $Z = 21.07$ en la frecuencia de 40 Hz, por tanto, se puede determinar que la velocidad de las partículas que se desarrollan sobre un medio es un factor determinante en el valor de la impedancia.

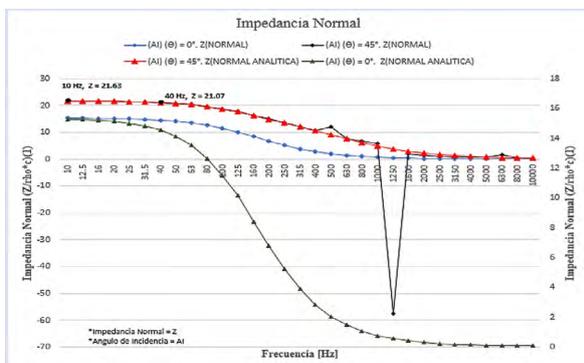


Figura 14. Impedancia Normal de la muestra B2, con los diferentes ángulos de incidencia: Angulo incidente (AI) $(\theta) = 45^\circ$; Angulo incidente (AI) $(\theta) = 0^\circ$; (AI) $(\theta) = 0^\circ$.

ZNORMAL Impedancia normal de superficie específica; (AI) $(\theta) = 0^\circ$. ZNORMAL ANALITICA Impedancia normal de superficie específica (analítica); (AI) $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica; (AI) $(\theta) = 45^\circ$. Impedancia normal de superficie específica (analítica).

Coefficiente de absorción vs Frecuencia

Los resultados del coeficiente de absorción se observan en la Figura 15, donde se puede identificar el valor del coeficiente de absorción en la curva con incidencia a 45° ((AI) $(\theta) = 45^\circ$ α) de $\alpha = 0.96$, $f = 1.6$ KHz, y de $\alpha = 0.28$, $f = 10$ KHz, que corresponde a la linealización del ángulo de incidencia a 45° (curva analítica para el coeficiente de absorción con incidencia a 45° . (AI) $(\theta) = 45^\circ$. (α analítica)), esta diferencia entre estos valores se da por la variabilidad de la curva en especial a partir de los 400 Hz, hay que considerar que la porosidad de los materiales es un factor de gran importancia en las simulaciones y por eso la disminución considerable del valor del coeficiente en la curva analítica a 45° .

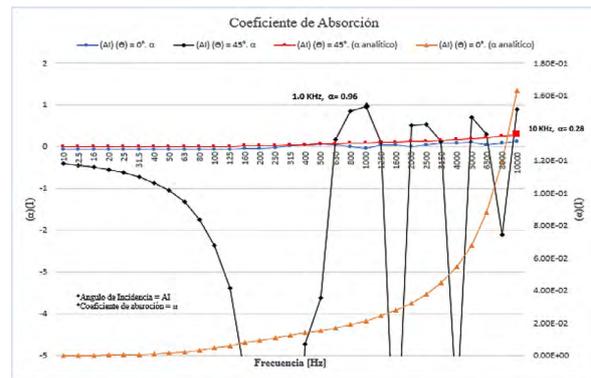


Figura 15. Coeficiente de absorción vs Frecuencia con los diferentes ángulos de incidencia: (AI) $(\theta) = 0^\circ$. α , (AI) $(\theta) = 0^\circ$. (α analítica); (AI) $(\theta) = 45^\circ$. α ; (AI) $(\theta) = 45^\circ$. (α analítica).

4. CONCLUSIONES

Al referirnos a la densidad de los bloques huecos de hormigón, la muestra B1 presenta la densidad más baja, registrando un valor de 205,205 kg/m³. Cabe destacar que, para calcular la densidad de este material de construcción, se tomaron en cuenta valores de masa tanto en condiciones de completa sequedad como cuando se encuentra completamente saturado, es decir, sumergido en agua. Estos valores de densidad son fundamentales para entender cómo el material se comporta cuando una onda acústica incide sobre él.

La porosidad es otro parámetro crucial para considerar en las simulaciones de materiales de construcción, ya que, si un material es muy poroso, permitirá el paso de ondas acústicas, lo que significa que no funcionará

como aislante de sonido. Al analizar los datos obtenidos de las muestras B1 y B2 de bloques huecos de hormigón, se determinaron porcentajes de porosidad de 22.41 y 18.62, respectivamente. Es evidente que estos bloques tienen una mayor porosidad en comparación con otros materiales de construcción, como los ladrillos, lo cual se traduce en que las simulaciones demostraron que estos bloques no poseen propiedades acústicas destacadas, afectando así el valor del coeficiente de absorción.

Los ensayos de compresión en los bloques permitieron calcular el valor del módulo de Young y la velocidad del sonido, que son características muy importantes para realizar las simulaciones de propagación acústica. Los resultados mostraron velocidades del sonido de 2.24 y 2.71 m/s, y módulos de Young de 0.71 y 0.81 m/s para las muestras B1 y B2, respectivamente. Estos parámetros permiten determinar la impedancia acústica, siendo el valor más bajo el del ladrillo B2, con un $Z = 16.74$. Es relevante tener en cuenta que esta propiedad analiza el movimiento de partículas en un medio.

Para llevar a cabo las simulaciones acústicas de las muestras de materiales de construcción, se utilizó el software COMSOL Multiphysics. Esto permitió calcular el coeficiente de absorción acústica considerando ángulos de incidencia de ondas de sonido de 0° y 45° , lo que facilitó identificar qué elemento analizado se comportaría mejor como inhibidor acústico. Los bloques obtuvieron valores de absorción de sonido de $B1 = 0.97$ y $B2 = 0.96$, lo que indica que el bloque B1 muestra el mejor comportamiento acústico, especialmente cuando la onda incide a un ángulo de 45° .

Mediante la experimentación y las simulaciones, se pudo determinar que los bloques de construcción estudiados tienen diferentes comportamientos cuando se someten a la incidencia de ondas de sonido, especialmente a un ángulo de incidencia crítico recomendado de 45° .

En resumen, los resultados de esta investigación muestran que el material estudiado, los bloques huecos de hormigón, es adecuado para la aplicación prevista debido a su alta tasa de absorción de ruido. Además, su bajo costo de producción lo convierte en una alternativa preferida para construir edificaciones destinadas al faenamiento animal.

5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Hipatia Delgado DemeraI;, Esnayra Roque PiñeroII;, Carlos Alfredo Cedeño Palacios;, and Alejandra Villoch CambasII;, "Análisis del cumplimiento de las Buenas Prácticas de faenado en cinco mataderos municipales de Manabí, Ecuador." http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-570X2015000200001 (accessed Jul. 27, 2023).
- [2] J. Abel Pin Figueroa, "PROCESO DE FAENAMIENTO Y MANEJO DEL GANADO BOVINO Y LA INCIDENCIA EN LA CONTAMINACIÓN DE LAS CANALES EN EL MATADERO MUNICIPAL DEL CANTÓN PAJÁN," 2010.
- [3] J. D. Quishpe-López, J. P. Lliguicota-Guarquila, Sarduy-Pereira L. ;, and K. Diéguez-Santana, "La producción más limpia, como estrategia de valorización (ecoeficiencia) del centro de faenamiento, Puyo, Pastaza, Ecuador."
- [4] C. Velásquez, "DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA PRODUCIDO POR EL TRÁFICO VEHÍCULAR MEDIANTE MONITOREO AMBIENTAL EN LA CIUDADELA 'VIEJA KENNEDY' GUAYAQUIL," 2023.
- [5] A. Marcotti F, B. Alvear V, A. Marcotti F, and B. Alvear V, "Pruebas de fusión auditiva y de detección de gaps: Evaluación de la resolución auditiva temporal," *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*, vol. 79, no. 2, pp. 248-260, Jun. 2019, doi: 10.4067/S0718-48162019000200248.
- [6] OCED (Organisation for Economic Co-operation and Development), "Home page - OECD," 2022. <https://www.oecd.org/> (accessed Mar. 21, 2023).
- [7] OMS, OMM, and PNUMA, "Cambio climático y salud humana-Riesgos y respuestas RESUMEN OMS OMM PNUMA," 2023.
- [8] Observatorio de Salud y Medio Ambiente, Unión Europea, and Gaes, "El Informe 'Ruido y Salud' se presenta con motivo del Día Mundial contra el Ruido," *Ecodes*, 2012. <https://archivo.ecodes.org/web/noticias/el-informe-ruido-y-salud-se-presenta-con-motivo-del-dia-mundial-contra-el-ruido> (accessed Mar. 21, 2023).
- [9] A.-E. CREȚU, "FACADE OF PERFORATED PLATE: ANALYSIS OF ITS ACOUSTIC BEHAVIOR," *SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE*, vol. 18, no. 1, pp. 317-322, 2016, doi: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.43.
- [10] A. Arjunan et al., "Sound frequency dependent mesh modelling to simulate the acoustic insulation of stud based double-leaf walls Crashworthiness and energy absorber design View project Additively manufactured functional biomaterials for bone reconstruction View project Sound frequency dependent mesh modelling to simulate the acoustic insulation of stud based double-leaf walls," 2014, Accessed: Mar. 21, 2023. [Online].

- Available: <https://www.researchgate.net/publication/330667963>
- [11] E. Nacional de Sanidad Instituto de Salud Carlos III, Efectos del ruido urbano sobre la salud: Estudios de análisis de series temporales realizados en Madrid. 2021. doi: 10.4321/repisalud.5434.
- [12] L. Fiala, P. Konrád, J. Maděra, and R. Crný, "Data acquisition and acoustic modeling of heterogeneous building materials," in AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC AIP Publishing, Jul. 2019, p. 070006. doi: 10.1063/1.5114057.
- [13] R. Fediuk, M. Amran, N. Vatin, Y. Vasilev, V. Lesovik, and T. Ozbakkaloglu, "Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review," *Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 1-28, Jan. 2021, doi: 10.3390/MA14020398.
- [14] N. Holmes, A. Browne, and C. Montague, "Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 195-204, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107.
- [15] M. Pereira, J. Carbajo, L. Godinho, J. Ramis, and P. Amado-Mendes, "Improving the sound absorption behaviour of porous concrete using embedded resonant structures," *Journal of Building Engineering*, vol. 35, p. 102015, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102015.
- [16] T. J. Cox and P. D'Antonio, "Book Review: Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application," *Building Acoustics*, vol. 12, no. 4, pp. 293-294, Dec. 2005, doi: 10.1260/135101005775219076.
- [17] G. Ciaburro and G. Iannace, "Numerical simulation for the sound absorption properties of ceramic resonators," *Fibers*, vol. 8, no. 12, pp. 1-16, Dec. 2020, doi: 10.3390/fib8120077.
- [18] J. kun Huang, X. wei Liu, X. hua Chen, and H. jun Xiang, "Multiple flexural-wave attenuation zones of periodic slabs with cross-like holes on an arbitrary oblique lattice: Numerical and experimental investigation," *J Sound Vib*, vol. 437, pp. 135-149, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jsv.2018.09.016.
- [19] R. Ibragimov and R. Fediuk, "Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers," *Constr Build Mater*, vol. 226, pp. 839-848, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313.
- [20] G. A. Cravero, M. D. Flores, L. Budde, and C. Longoni, "Medición y simulación de tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de aulas," *Mecánica Computacional*, vol. XXXII, no. 34, pp. 19-22, 2013, Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <http://venus.santafe-conicet.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4526>
- [21] S. Park, "Vibro-acoustic numerical simulation for analyzing floor noise of a multi-unit residential structure," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 20, p. 4289, Oct. 2019, doi: 10.3390/app9204289.
- [22] Z. Xu, W. He, F. Xin, and T. J. Lu, "Sound propagation in porous materials containing rough tubes," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 9, p. 093604, Sep. 2020, doi: 10.1063/5.0017710.
- [23] NTE INEN 638, "NTE INEN 638 BLOQUES HUECOS DE HORMIGÓN. DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN Y CONDICIONES GENERALES. HOLLOW BLOCKS OF CONCRETE. DEFINITIONS, CLASSIFICATION AND GENERAL CONDITIONS," 2010.
- [24] NTE INEN 638, "Bloques Huecos de hormigón. Definiciones , Clasificaciones Y Condiciones," *Norma Técnica Ecuatoriana*, vol. 2332, no. 1, pp. 1-5, 2002.
- [25] INEN 857, "Áridos. Determinación de la Densidad Relativa(Gravedad Específica) y Absorción del Arido Grueso. INEN 857," *INEN 857*, vol. 1, no. Primera Edición, pp. 1-14, 2010.
- [26] NTE INEN 857:2010, "Instituto Ecuatoriano de Normalización Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 857:2010 Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica)," 2010.
- [27] NTE INEN 573, "Ecuatoriana Nte Inen 2854," *NTE INEN 573*, no. VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIA. REQUISITOS, p. 34, 2015.
- [28] N. Técnica Ecuatoriana, M. Refractarios, D. De, L. A. Porosidad, A. De Agua, and D. Aparente, "MATERIALES REFRACTARIOS DETERMINACION DE LA POROSIDAD ABSORCION DE AGUA Y DENSIDAD APARENTE INEN 573".
- [29] NTE INEN 3049, "NTE INEN 3049-2019. Ladrillos cerámicos. Parte 5: Métodos de ensayo," *NTE INEN 3049*, 2019.
- [30] NTE INEN 3049, "Equipos de protección individual contra caídas. Cuerdas trenzadas con envoltura, semiestáticas. Requisitos y métodos de ensayo," 2015.
- [31] NTE INEN 3066, "NTE INEN 3066: Bloques de hormigón, requisitos y métodos de ensayo. Servicio Ecuatoriano de Normalización," p. 27, 2016.

- [32] NTE INEN 3066, “Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria BLOQUES HUECOS DE HORMIGON REQUISITO INEN 3066,” 2016. Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <http://181.112.149.204/buzon/normas/643.pdf>
- [33] NTE INEN 2619:2012, “BLOQUES HUECOS DE HORMIGÓN, UNIDADES RELACIONADAS Y PRISMAS PARA MAMPOSTERÍA. REFRENTADO PARA EL ENSAYO A COMPRESIÓN,” 2012.
- [34] COMSOL Multiphysics Reference Manual, “COMSOL Multiphysics Reference Manual,” 2019. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
- [35] T. COMSOL, “Comsol Benefits,” COMSOL, Team, 2020.
- [36] COMSOL, “COMSOL Multiphysics® v. 5.4 Reference Manual,” p. 1622, 2018.
- [37] H. González, S. Hellwig, and J. A. Montoya, “Resultados del ensayo del módulo de Young y resistencia a la flexión de vigas laminadas de Guadua angustifolia Kunth.,” *Scientia et Technica*, vol. XIV, no. 40, pp. 291–296, 2008, doi: 10.22517/23447214.3057.
- [38] J. Torres, M. Petite, J. Carbajo, E. Segovia, and J. Ramis, “Caracterización de la impedancia de transferencia de materiales porosos-fibrosos usando holografía acústica de campo cercano (NAH),” 2014, Accessed: Mar. 23, 2023. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/46005>
- [39] Lancón L, “EN MODELOS FÍSICOS A ESCALA Laura Angélica Lancón Rivera,” 2012.
- [40] I. 266 NTE, “EX,” 2014.
- [41] C. AB, “Acoustics Module,” *Acoustics Module, Interfaces*, p. 214, 2010.
- [42] P. A. COMSOL, “Porous Absorber,” COMSOL, Porous Absorber, pp. 1–22, 2012.
- [43] J. Gaibor, “Desarrollo, Elaboración y Caracterización de un material compuesto con base de materiales reciclados para la fabricación de ladrillos destinados a mamposterías con propiedades de aislamiento acústico,” *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2021.

