

Mitigación Acústica en el Templo Santa Clara de la Ciudad de El Alto

Alejandro Vázquez Rivero¹

jvazquez@ucb.edu.bo

<https://orcid.org/0000-0002-9741-6293>

Universidad Católica Boliviana San Pablo
La Paz – Bolivia

Martin Valverde Maceda

mvalverde@ucb.edu.bo

<https://orcid.org/0009-0009-9253-634X>

Universidad Católica Boliviana San Pablo
La Paz - Bolivia

Guido Adalberto Villena Valle

gvillena@ucb.edu.bo

<https://orcid.org/0009-0007-4745-0091>

Universidad Católica Boliviana San Pablo
La Paz – Bolivia

RESUMEN

El padre Sebastián Obermaier impulsó la arquitectura religiosa en la ciudad de El Alto con la edificación de templos, en los mismos se encuentra una característica en la composición de los muros que permite una reverberación acústica muy elevada, por lo cual, al momento de hablar, el eco es demasiado fuerte y limita la capacidad de escuchar claramente. Es por ello que en la presente investigación se buscará generar un prototipo de panel absorbente acústico que permita reducir la reverberación acústica en el templo de “Santa Clara”. Para lograr realizar estos paneles, se experimenta con cinco variantes de los mismos a escala reducida y se utilizan materiales reciclados como materia prima, para alcanzar el mejor resultado en cuanto a la densidad y porosidad de éstos. La investigación realizada tiene como propósito estudiar factores que permitan mitigar la resonancia acústica que causa la reverberación del sonido del templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto, con la implementación de métodos constructivos y materiales reciclados que permitan reducir la reverberación y mejorar la acústica. Es un tipo de investigación con enfoque cuantitativo de tipo experimental y como herramientas: la observación, por medio de instrumentos tecnológicos como son: sonómetros, analizador de frecuencias y calibrador acústico, que ha posibilitado la recopilación de datos y posterior procesamiento aplicando fórmulas pertinentes. Desde la metodología de Bruno Munari se aplica una Metodología Proyectual. Se ha logrado descubrir el origen de la resonancia, se cumple en analizar cuál es la mecánica de la acústica, se sienta las bases de la información a cerca de materiales absorbentes, difusores y reflectivos, se alcanza en examinar las diferentes soluciones constructivas para mejorar el aislamiento acústico mediante la experimentación con cinco tipos de prototipos a escala reducida de paneles absorbentes acústicos hechos con diferentes materiales reciclados a partir lo cual se puede generar un prototipo a escala natural para ser producido en volumen acorde a la necesidad de las áreas a intervenir del templo. Con lo que la resonancia disminuye a parámetros establecidos.

Palabras clave: arquitectura acústica; tecnología; reverberación; resonancia acústica; materiales absorbentes

¹ Autor principal

Correspondencia: jvazquez@ucb.edu.bo

Acoustic Mitigation in the Santa Clara Temple of the City of El Alto

ABSTRACT

Father Sebastián Obermaier promoted religious architecture in the city of El Alto with the construction of temples, in which there is a characteristic in the composition of the walls that allows a very high acoustic reverberation, which is why, at the time of speaking, the echo is too loud and limits the ability to hear clearly. That is why in this research we will seek to generate a prototype of an acoustic absorbing panel that will reduce the acoustic reverberation in the temple of “Santa Clara”. To make these panels, five variants of them are experimented on a reduced scale and recycled materials are used as raw materials, to achieve the best result in terms of their density and porosity. The purpose of the research carried out is to study factors that allow mitigating the acoustic resonance caused by the reverberation of the sound of the “Santa Clara” temple in the city of El Alto, with the implementation of construction methods and recycled materials that allow reducing the reverberation and improving the acoustics. It is a type of research with a quantitative experimental approach and as tools: observation, through technological instruments such as: sound level meters, frequency analyzer and acoustic calibrator, which has made possible the collection of data and subsequent processing by applying relevant formulas. From the methodology of Bruno Munari, a Project Methodology is applied. The origin of resonance has been discovered, the mechanics of acoustics have been analyzed, the foundations of information about absorbing, diffusing and reflective materials have been laid, and the different construction solutions have been examined to improve the acoustic insulation through experimentation with five types of reduced-scale prototypes of acoustic panels made with recycled materials from which a full-scale prototype is generated to be produced in volume according to the need of the areas to be intervened in the temple. With which the resonance decreases to established parameters.

Keywords: acoustic architecture; technology; reverberation; acoustic sound; absorbent materials

Artículo recibido 25 noviembre 2023

Aceptado para publicación: 30 diciembre 2023

INTRODUCCIÓN

Problema de investigación

En la arquitectura religiosa de la ciudad del Alto, resalta un número importante de templos construidos por el padre Sebastián Obermaier. Un artículo de Deutsche Welle, en una entrevista a Luis Sosa de la Fundación Cuerpo de Cristo, caracteriza a estos templos como infraestructuras coloridas y que se componen de típicas cúpulas bulbosas y detalles barrocos destacan del panorama urbano de El Alto. El sacerdote alemán Sebastián Obermaier mandó a construir más de setenta (70) templos en Bolivia. (Traeder, 2016). Es así que su arquitectura es muy particular.

El Templo “Santa Clara” es uno de los templos construidos bajo el mando del padre Obermaier, se encuentra ubicado en El Alto. Al igual que la mayoría de los templos cuenta con mala acústica generando reverberación (eco) en todo el espacio, evitando que las misas sean escuchadas con claridad por la población (feligreses) que visita esta infraestructura religiosa.

Al realizar una visita al templo se pudo evidenciar in situ que el sonido rebota en los muros de ladrillo y el techo, esto debido a la forma del techo, por otro lado, también influye la materialidad del suelo que es de cerámica.

La característica actual de la resonancia acústica de este templo impide que el mensaje llegue claro a los feligreses que acuden a este recinto. La causa de esta problemática obedece a los materiales utilizados en su construcción, así como a su infraestructura arquitectónica. En éste sentido la presente investigación proyectual parte de la problemática que implica el acondicionamiento acústico, donde se estudia y analiza teóricamente las diversas características del sonido y los requerimientos necesarios para un buen acondicionamiento acústico dentro de un recinto de arquitectura religiosa: Templo “Santa Clara”. Principalmente se profundiza en los materiales absorbentes con material reciclado, valorando los adecuados para dicha función.

En la actualidad se está lidiando con un importante problema en la gestión de desechos sólidos a nivel mundial. En este caso, se habla de botellas pet, esponja, algodón, tela poliéster, que son los que existen en mayor cantidad, al menos en el medio de la ciudad de La Paz.

Estos materiales presentan distintas características que pueden aprovecharse para reutilizarse como materia prima para la generación de paneles absorbentes acústicos, que permitan reducir la

reverberación acústica en el templo “Santa Clara” del padre Sebastián Obermaier. Por ello, es necesario realizar una investigación que permita determinar cuáles son los materiales que podrían funcionar de manera óptima para absorber el sonido, de tal forma que se puedan realizar una serie de paneles acústicos que funcionen de manera correcta, mediante el uso de materiales reciclados.

La densidad y porosidad de los paneles deberá ser la adecuada para una buena absorción del sonido, por lo que se estima que llegar a 40 y 70 Kg/m³ es lo ideal en la experimentación, sin embargo como la unidad de medida utilizada es gramos (gr) y centímetros cúbicos (cm³) entonces se toma en cuenta entre 0.040 gr/cm³ y 0.070 gr/cm³ (Cortinas para Aislamiento Acústico, 2023)

Planteamiento del problema

El planteamiento del problema tiene como fuente dos cuestionamientos: el primero discute el tema de mejorar la acústica utilizando paneles absorbentes acústicos con material reciclado experimentando desde cinco prototipos a escala reducida variando con diferentes materiales reciclados, y el segundo se pregunta la consecuencia del mecanismo acústico y la percepción del espacio, en la infraestructura arquitectónica religiosa, objeto de estudio. Es así que el planteamiento del problema aborda la resonancia acústica que provoca la reverberación del sonido (eco) a causa de los materiales empleados, así como también la organización y distribución del espacio, en el templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto.

Formulación del problema

¿Cómo se puede mitigar la resonancia acústica para evitar la reverberación del sonido (eco) en el Templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto utilizando paneles absorbentes acústicos con material reciclado?

Justificación

Esta investigación abarca un problema que afecta a un sector social, por una parte: feligreses que acuden a este recinto religioso y por otra: el eclesiástico (“sacerdote”), que está al servicio de estos feligreses y que tiene como función — cuando está en una ceremonia religiosa, por ejemplo — transmitir la prédica

² “Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m³.” <https://www.cortinasacusticas.net/2018/08/06/la-densidad-de-los-materiales-acusticos/#:~:text=Desde%20un%20punto%20de%20vista,caso%20los%20100%20Kg%20m3.>

y el sermón dentro del templo, entonces, el interés de la presente investigación es mitigar la resonancia acústica para evitar la reverberación del sonido (eco) en el templo.

Con la presente investigación se propone la utilización de un producto accesible a partir de materiales reciclados para la generación de un nuevo material absorbente. De esta forma se aporta al medioambiente para una arquitectura tecnológica – ecológica, amigable con el medio ambiente.

Por otro lado, profundizar investigación en temas de resonancia acústica, reverberación del sonido y tecnología ecológica aplicable a la arquitectura, en este caso, desde la arquitectura religiosa a partir de una perspectiva específica como lo es la arquitectura acústica ecológica, lo que evoca a un interés académico, esto se traduce en un importante aporte a la gestión de datos para futuros investigadores. La utilización de paneles absorbentes acústicos construidos desde material reciclado aporta para disminuir los efectos adversos del ruido en la arquitectura religiosa, dado que la solución propuesta desde paneles absorbentes acústicos con material reciclado podría tener aplicación en este tipo de arquitectura, entre otros. Es así el aporte deja posibles líneas de investigación y proyectos futuros en materia de Arquitectura Tecnológica- Ecológica en el ámbito de Arquitectura Religiosa.

Viabilidad

La presente investigación es posible y pertinente tanto en su experimentación, intervención y propuesta, de manera satisfactoria, debido a que se dispone de los recursos metodológicos, científicos, arquitectónicos, ecológicos y tecnológicos necesarios para realizar las pruebas, la intervención y la propuesta desde prototipos de paneles absorbentes acústicos a escala reducida construidos con material reciclado.

Antecedentes investigativos

El año 2013 se hizo un estudio acústico de la iglesia de Santa María del Castillo, como proyecto de fin de carrera de la Universidad Politécnica de Madrid (España) Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, se ha realizado un estudio sobre las condiciones acústicas de esta iglesia y a partir de unas complejas mediciones del interior de esta infraestructura se ha realizado un modelo tridimensional del mismo como base para la simulación mediante software de simulación acústica EASE versión 4.3, que ha servido para crear coeficientes de absorción correspondientes a cada material presente en el interior de la iglesia lo que permite obtener valores de diferentes parámetros acústicos,

como el tiempo de reverberación y el nivel de presión sonora para saber cómo es el campo sonoro de su interior, así como otros parámetros como el ALCons y el STI que da resultados sobre la inteligibilidad de la palabra en el recinto. Y se tiene como conclusión que la iglesia estudiada no es un recinto apropiado para la palabra o la música, además del predominio del campo reverberante por las dimensiones del recinto. (Ávila Gonzales, 2013). Este trabajo aporta al tema del problema de reverberación en este tipo de arquitectura religiosa.

Otro estudio dentro de la Acústica Arquitectónica, esta una tesis doctoral del año 2008, cuyo objeto es estudiar y conseguir un acondicionamiento y un aislamiento acústico al uso previsto de iglesias, existen muchas exigencias que deben de cumplirse para que la audición sea la correcta. Esta tesis considera la importancia de la palabra y su correcta inteligibilidad en este tipo de recintos religiosos, desde un punto de vista acústico. Identifica como causa del problema acústico a la compleja geometría de estos recintos religiosos, a sus bóvedas y cúpulas que causan campos sonoros de una complejidad extraordinaria. Esta tesis aporta una “ecuación de predicción del tiempo de reverberación y de la absorción acústica para iglesias, divididas en recintos de hasta 3.000 m³ y de hasta 150.000 m³.” (de Barrio Mora, 2008, págs. 2-5)

Por último, el año 2016 una tesis de pregrado tiene como objetivo “Rediseñar las condiciones acústicas actuales de la Parroquia del Sagrado Corazón de Jesús. Proponiendo la adquisición de nuevos equipos y colocación de materiales que beneficien la acústica del recinto”. (Maestro Jorge, 2016, pág. ii). El trabajo tiene como resultado “la elaboración de todo un proyecto de acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro” (Maestro Jorge, 2016, pág. 99). Es otro aporte al tema del problema de reverberación en este tipo de arquitectura religiosa.

Estos tres estudios previos — sin embargo, se ha tenido acceso a más referencia bibliográfica — arroja información muy pertinente a la presente investigación.

MARCO TEÓRICO

Iglesias y materiales de construcción

Para McNamara, la materialidad terrenal de Dios tiene argumentos en numerosos escritores cristianos ya que “el mismo cuerpo encarnado de Cristo revelaba a Dios invisible a través de su materialidad terrenal” es así que, también, los humanos “podrían hacer lo propio con materiales como la piedra, la

pintura, la madera, el oro o el vidrio”, tema que ha traído discusiones teológicas que ha puesto en debate la naturaleza de los “edificios eclesiásticos”. Al respecto sigue indicando el autor: “Pero cuando vea varias artes integradas en un edificio eclesiástico, comprobará que se ha usado casi cualquier material imaginable para lograr adaptarse a las necesidades del momento, así como dar forma física a un concepto teológico” (2015, pág. 56)

En suma, no hay una lógica o normativa para utilizar materiales en la construcción de un templo o edificio eclesiástico, en consecuencia, queda a la libre imaginación. Empero, durante siglos, “los arquitectos han elegido usar materiales conforme a convenciones de diseño cargadas de sentido, de modo que las jerarquías de materiales forman tradicionalmente un código legible en la sintaxis arquitectónica.” Ahora en el tema estructural, “los materiales más duraderos sostienen a los más delicados, y los materiales raros o muy acabados indican importancia.” (McNamara, 2015, pág. 58)

Este mismo autor describe los diferentes materiales utilizados para construir edificios eclesiásticos:

Revestimientos internos

Según McNamara los interiores de estos lugares eclesiásticos están “dotados de carga histórica y teológica, y las paredes de las iglesias soportan mucha de esta riqueza literal y figurativa.” Las Superficies verticales están cubiertas de “placas, memoriales y objetos devocionales”, incluso los muros se convierten en “registros teológicos”. En el interior de una iglesia las paredes tienen un aspecto lustroso y geoméricamente trabajado, gracias al “revestimiento de piedra y el panelado de madera”. (McNamara, 2015, pág. 76)

Plantas de las iglesias

La forma y distribución de las plantas de las iglesias “surgen de la tradición local, la necesidad funcional y la significación teológica”. Existen iglesias que han sido proyectadas en sus plantas para albergar gran número de personas, mientras que otras están “diseñadas para visitas personales de familias o peregrinos”. Existen plantas largas y estrechas, lo que enfatiza la procesión y el peregrinaje, por otro lado, las plantas centralizadas “focalizan la mirada del visitante sobre un punto determinado, normalmente una tumba o lugar de veneración”. Así también “Al imitar las plantas de iglesias importantes los edificios locales pueden asociarse visualmente con centros espirituales, mientras que la

posición de los asientos, el altar o el púlpito habla claramente de las prioridades teológicas de una congregación.” (McNamara, 2015, pág. 82)

Cálculo del tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación se calcula en “función del volumen de la sala y del coeficiente de absorción de las superficies de ésta.” (Boschi, 2008, pág. 3)

Fórmula de Sabine

La fórmula para el cálculo del tiempo de reverberación fue formulada por Sabine tiene como punto de partida primero, un “reparto homogéneo de absorbentes con un coeficiente de absorción bajo”. Y escribe la fórmula y la descompone explicando (Boschi, 2008, pág. 3):

$$T = 0.161 [V7A]$$

Las variables de la fórmula son:

T = Tiempo de reverberación [s]

V = Volumen de la sala [m³]

A = Absorción total [m²]

Obtenida a partir de:

$$A = S$$

Siendo:

a Coeficiente de absorción sonora

S Área de la superficie de la sala [m²]

Fórmula de Norris – Eyring

Citando a Davis y Davis (1987) Boschi puntualiza que: “Esta fórmula solo es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límite.”

También la escribe y la explica en sus partes (2008, pág. 3):

$$T = 0.161 [V/(-S \ln (1 - a_m))]$$

Donde:

a_m Coeficiente de absorción medio

Fórmula de Million – Sette

Este mismo autor indica que “Si los coeficientes de absorción que entran en juego difieren grandemente unos de otros, es conveniente utilizar la siguiente formula de Million – Sette.” (2008, págs. 3 - 4):

$$T = 0.161 [V/(-\sum S_i \ln (1 - i))]$$

Donde:

S_i Área del material i ésimo [m²]

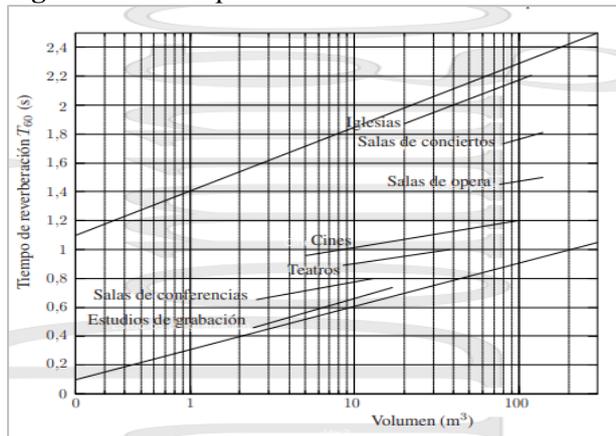
a_i Coeficiente de absorción de dicho material

El autor finaliza advirtiendo que: “En todos los casos no se ha tenido en cuenta el factor de absorción del aire, el cual solo resulta significativo para las cortas longitudes de onda, sobre todo en salas de gran volumen, mayor a 5000 m³.” (Boschi, 2008, pág. 4)

El tiempo ideal de reverberación

Existen diferencias cuantitativas entre distintos autores, pero cualitativamente son similares lo que hace que no exista una definición uniforme para tiempo de reverberación óptimo. Para definir un tiempo de reverberación optimo hay que tomar en cuenta el volumen del local y cuál es el destino del mismo, esto permite definir los valores del tiempo de reverberación. (Domingo, 2022)

Figura 1: El tiempo ideal de reverberación



Nota: El gráfico representa los valores habituales del tiempo de reverberación óptimo en función del volumen del local para distintos usos del mismo. Tomado de Apuntes de Acústica (p. 34), por A.M. Domingo, 2022, <https://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf#page=33&zoom=100,96,830>, Author Editor.

En la : El tiempo ideal de , se muestran unos rangos aproximados de valores del tiempo de reverberación óptimo, en función del volumen del local y de su uso previsto. (Domingo, 2022)

Al respecto el autor aclara: “Además de las sugerencias que pueda dar la figura anterior, a menudo se utilizan distintas expresiones empíricas para calcular el tiempo de reverberación con el que se espera obtener la mayor calidad del sonido en el recinto a acondicionar.” (Domingo, 2022, pág. 34)

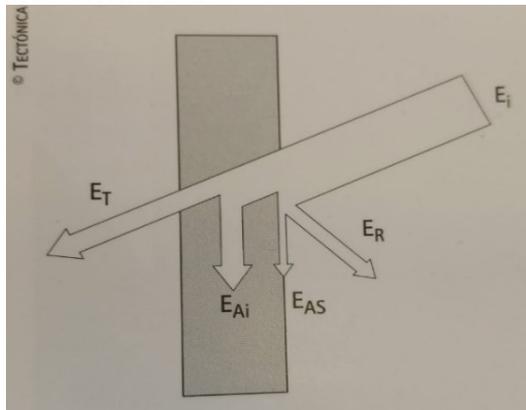
En este sentido Domingo (2022, pág. 33) expresa que la fórmula para expresar de manera empírica el tiempo de reverberación óptimo es:

$$T_{60}^{opt} = K_{frec} \cdot K_{uso} \cdot K_{apoyo} \sqrt[3]{V}$$

[...] donde K_{frec} es un coeficiente que depende de la frecuencia (p.ej., es de 1,3 para 125 Hz y de 0,9 para 4 kHz), K_{uso} es un coeficiente que depende del uso del local (p.ej., es de 0,075 para palabra y de 0,10 para música), K_{apoyo} es un coeficiente que depende del apoyo electro acústico (p.ej., es de 1 sin apoyo y de 0,085 con apoyo, aunque depende de la intensidad del apoyo) y V es el volumen del recinto en m^3 . Esta expresión correspondería al local vacío y necesita un ajuste cuando se tiene en cuenta la absorción sonora de los ocupantes. Además de ésta, hay toda una serie de expresiones empíricas, en algunos casos únicamente para un tipo de sala. (Domingo, 2022, pág. 34)

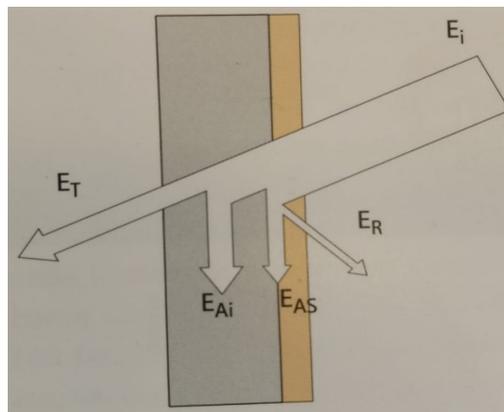
Balance energético del sonido.

Figura 2: Balance energético del sonido sin acondicionamiento



Nota: El gráfico ilustra el comportamiento de las ondas sonoras sobre una superficie sin acondicionamiento. Tomado de *Introducción a la acústica arquitectónica Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento* (p.9), por G. Rosello V. & J. M. Marzo D., 2002, TECTONICA (14)

Figura 3: Balance energético del sonido con acondicionamiento



Nota: El gráfico ilustra el comportamiento de las ondas sonoras sobre una superficie con acondicionamiento. Tomado de *Introducción a la acústica arquitectónica Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento* (p.9), por G. Rosello V. & J. M. Marzo D., 2002, TECTONICA (14)

En las dos siguientes figuras se representa el balance energético del sonido en dos condiciones: con acondicionamiento y sin acondicionamiento.

La **figura 2** representa el choque de ondas sonoras en una pared sin acondicionamiento, existe una energía incidente (E_I), la misma es parcialmente reflejada (E_R), “parcialmente absorbida superficialmente (E_{AS}), parcialmente aislada interiormente (E_{Ai})” y por último parcialmente transmitida (E_T).” (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002, pág. 9)

La **figura 3** representa el choque de ondas sonoras en una pared con acondicionamiento, aquí las Energías: E_i , E_{Ai} y E_T no sufren alteración alguna, sin embargo, la energía absorbida superficialmente (E_{AS}) sufre alteración, o sea se incrementa mientras que la energía reflejada (E_R) se reduce.

Aislamiento acústico — Acondicionamiento acústico — Absorción acústica

De las figuras 2 y 3 explicadas en el punto precedente Rosello Vilarroig & Marzo Diez indican que: “Aislar consiste en evitar la propagacion de la energía acústica entre distintos locales; actúa sobre la energía transmitida.” (2002, pág. 9)

Utilizando las notas de la idea anterior, pero al contrario, “el acondicionamiento intenta conseguir unas características acústicas determinadas en un recinto actuando sobre la energía reflejada.” (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002, pág. 9)

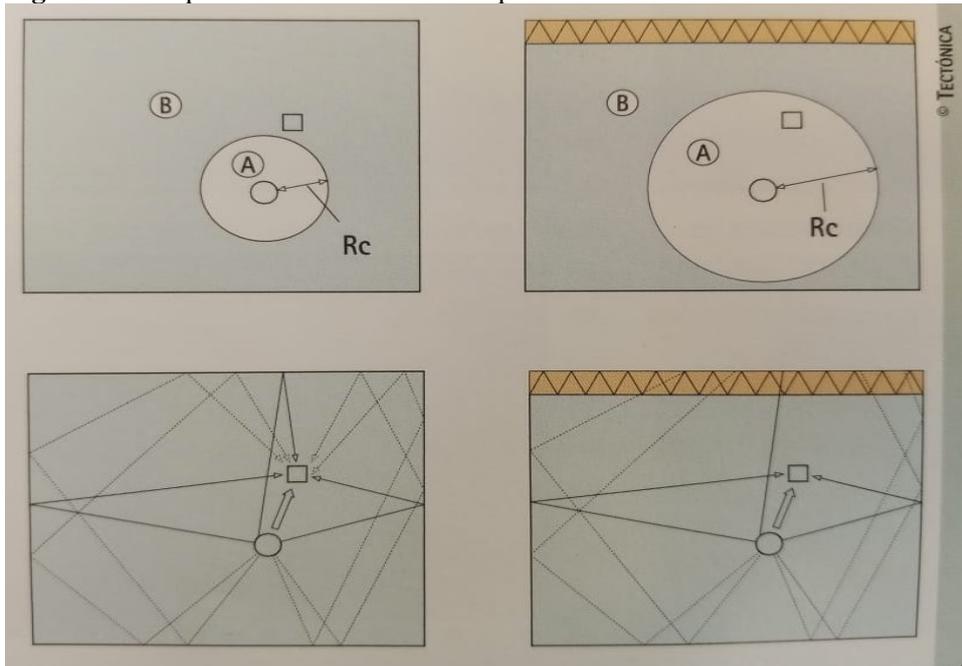
Estas mismas autoras dan explicación de lo que se puede entender por absorción, y afirman:

Cuando añadimos absorción sobre la superficie de una pared, reducimos la cantidad de energía reflejada E_R , pero nunca actuamos sobre la transmitida o sobre lo que aísla el muro. Indirectamente, sin embargo, si hay un efecto positivo pues disminuye el nivel sonoro en el local emisor y, por consiguiente, llega menos energía al local receptor. (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002, pág. 9)

Campo sonoro

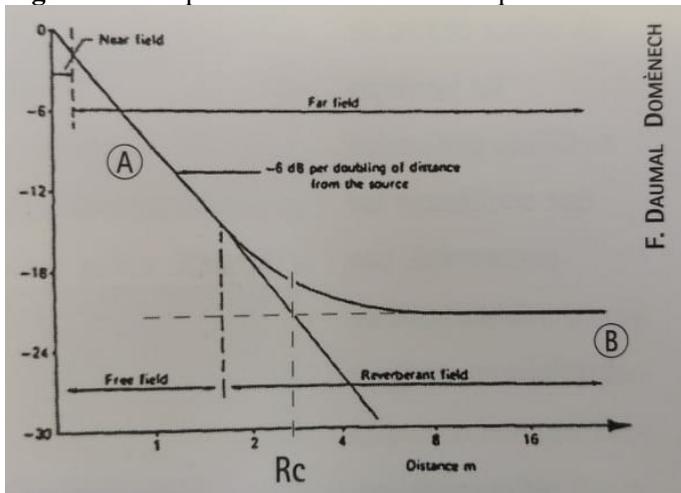
La presión sonora va a variar si es en un recinto cerrado o en campo abierto. La **figura 4 y 5** grafica el comportamiento de éste fenómeno acústico.

Figura 4: Campo sonoro. Aumento de la presión sonora en un recinto cerrado



Nota: La gráfica demuestra el comportamiento del nivel sonoro en un campo abierto y en un espacio reverberante en dos condiciones: sin acondicionamiento (las dos figuras de la izquierda) y con acondicionamiento (las dos figuras de la derecha). Tomado de Introducción a la acústica arquitectónica Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento (p.9), por G. Rosello V. & J. M. Marzo D., 2002, TECTONICA (14)

Figura 5: Campo sonoro. Aumento de la presión sonora en un recinto cerrado



Nota: La gráfica demuestra el comportamiento del nivel sonoro en un campo abierto y en un espacio reverberante. Tomado de Introducción a la acústica arquitectónica Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento (p.9), por G. Rosello V. & J. M. Marzo D., 2002, TECTONICA (14)

El nivel sonoro será más elevado en un recinto cerrado: campo reverberante, a diferencia que en un campo al aire libre o abierto, las ondas que produce un sonido y que salen de una fuente, en un campo abierto o al aire libre, no van a encontrar obstáculos, mientras que en un recinto cerrado, que es un

campo reverberante, estas ondas encontrarán obstáculos que propiciará sean reflejadas. (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002)

Las autoras continúan indicando que “El nivel sonoro de campo directo (A) disminuye al alejarse de la fuente sonora mientras que en el campo reverberante (B) — zona de predominio del sonido reflejado — es constante.” Existe un radio crítico R_c que “marca el límite entre ambos campos, siendo la inteligibilidad mayor en el directo, por lo que, para mejorarla se debe reducir el campo reverberante aumentando la absorción.” (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002, pág. 9)

Materiales absorbentes

También llamados materiales acústicos “son aquellos que tienen la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas acústicas que chocan contra ellos.” (Mena Sanchis, 2013, pág. 22)

La característica de este material es que sea de superficie relativamente transparente al sonido, lo que posibilitara que absorba energía sonora y además, que “el medio sea capaz de transformar más o menos completamente la energía vibratoria de las ondas en energía calorífica de fricción.” (Mena Sanchis, 2013, pág. 22)

Este mismo autor de una tesis de maestría, desde su investigación asegura que:

La transparencia acústica se puede conseguir mediante una superficie expuesta a un material altamente poroso, o bien una lámina perforada usada como revestimiento de un material poroso, también mediante una membrana ligera flexible impermeable al aire o perforaciones o grietas mecánicas en el cuerpo de un material poroso, pudiendo ser la superficie externa impermeable. Todos estos materiales producen una disminución de las transparencias a medida que aumenta la frecuencia. Las pérdidas de energía acústica en los materiales se pueden caracterizar mediante el coeficiente de **absorción acústica α** , entendiéndose por tal a la relación entre la energía acústica absorbida por un material y la energía acústica incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y que puede variar desde un 1 o 2 % al 95 - 98%, para diferentes materiales. (Mena Sanchis, 2013, pág. 22)

Tipos de materiales absorbentes

Materiales porosos o fibrosos de poro abierto

La característica de este tipo de materiales radica en que “al incidir la onda acústica sobre ellos, se refleja una porción muy pequeña.” Lo que ocurre es que se “produce una pérdida de energía cinética de las partículas,” del aire, “por transformación en energía calorífica desarrollada en el rozamiento” esto a causa que estas partículas penetran este tipo de material a través de sus canales. Las partículas del aire que penetran este material, siguen vibrando a través de los mismos “y en esta vibración se produce un rozamiento con las paredes de estos poros o canales. Pero para que esto ocurra, debe existir una velocidad relativa entre las partículas del aire en movimiento y las paredes de los canales.” Lo que significa que cuando “mayor rigidez de la estructura del material mayor será la velocidad relativa y por tanto se producirá mayor rozamiento y así mayor será la absorción obtenida por este mecanismo.” Ahora bien, que pasa si la estructura de este material es flexible, entonces “se produce menor rozamiento y menor pérdida de calor,” debido a que “las paredes de los canales entrarán también en vibración, en este caso se producirá una pérdida por transformación de energía acústica en mecánica, al moverse las paredes de los poros.” (Mena Sanchis, 2013, pág. 23)

Membranas

En este tipo de materiales “el mecanismo de absorción por transformación de la energía del campo acústico en energía mecánica, el principio de funcionamiento es la puesta en movimiento o vibración, mediante la energía acústica, de una membrana u otro elemento.” (Mena Sanchis, 2013, pág. 24)

En consecuencia este mecanismo de absorción ocasiona que, “la energía acústica incidente se reparte entre la energía transmitida del material (energía mecánica que lo pone en vibración) y la energía reflejada (despreciable, prácticamente inaudible).” (Mena Sanchis, 2013, pág. 24)

Resonadores

Mena Sanchis describe a este material absorbente:

Están constituidos por recipientes cerrados de volumen, sin otra comunicación con el exterior que una abertura relativamente estrecha. Cuando existe una presión acústica en la entrada del resonador, la masa contenida en el tubo sufre una serie sucesiva de contracciones y dilataciones. (2013, pág. 25)

Y con respecto a otras características del mismo:

El aire contenido en el volumen opone una fuerza a estos desplazamientos comportándose como un resorte. La presión, que actúa sobre el resonador, comunica al aire contenido en el cuello una velocidad tanto mayor cuando más próxima es la frecuencia del sonido a su frecuencia propia de resonancia. (Mena Sanchis, 2013, pág. 25)

Acondicionamiento acústico

La forma en que se trata el sonido y como va a ser transmitido por los caminos de comunicación a partir de donde o quien lo genera hasta los oyentes, quiere decir que se está hablando de acondicionamiento acústico, según el doctor en arquitectura. (Daumai i Domènech, 2002)

Payá indica que es necesario acondicionamiento acústico en las iglesias debido a que en este tipo de locales el sonido es fundamental, también afirma que el tiempo de reverberación en los mismos es excesivo y causa que la audición sea deficiente y provoca que la palabra sea difícil de comprender. (1976)

Para mejorar las condiciones acústicas de sonoridad, según Maestro Jorge en su tesis de pregrado, es necesario incrementar el confort acústico interno de un recinto, con la finalidad de conseguir un grado de difusión acústica uniforme en todos los ambientes del mismo. El aporte del profesor W. C. Sabine (1895) se resume en dos puntos: 1) “Las propiedades acústicas de un recinto están determinadas por la proporción de energía sonora absorbida por paredes, techos, suelos y objetos.” y 2) “La proporción de sonido absorbido está ligado al tiempo que un sonido emitido en el local desaparezca después de suprimir el foco sonoro.” (Maestro Jorge, 2016, pág. 21)

En este sentido, existen “mecanismos que permiten el diseño de unas condiciones acústicas específicas en un recinto” y “actúan sobre las condiciones de absorción, difusión y reflexión del sonido.” (Roselló Vilarroig & Marzo Diez, 2002, págs. 9 - 10)

Objetivo principal

Proponer un prototipo de panel absorbente acústico a escala reducida construido a partir de materiales reciclados absorbentes para posteriormente sea producido en volumen y a escala natural para mitigar la resonancia acústica y evitar la reverberación del sonido (eco) en el templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto.

Objetivos secundarios

- 1) Examinar la resonancia por medio de un estudio acústico en el templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto, para descubrir el origen de la resonancia acústica en el lugar y basar la información sobre materiales absorbentes, difusores y reflectivos.
- 2) Obtener datos y propiedades acústicas sobre los materiales reciclados disponibles para determinar qué materiales son óptimos para experimentar.
- 3) Experimentar con distintos paneles absorbentes acústicos a escala reducida construido con materiales reciclados que tengan una buena densidad y absorción del sonido.
- 4) Generar un prototipo a escala natural de panel acústico funcional para ser producido en volumen

Hipótesis investigativa

La instalación de paneles absorbentes acústicos construidos con material reciclado permite mitigar la resonancia acústica para evitar la reverberación del sonido en el Templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto.

Hipótesis proyectual

Mediante experimentación con cinco diferentes paneles absorbentes acústicos hechos a escala reducida y construidos con diferentes materiales reciclados, se puede calcular la densidad ideal para que sea replicado a escala natural.

METODOLOGÍA

Metodología investigativa

El enfoque utilizado, es **cuantitativo** debido a que fue necesario procesar datos numéricos para responder a la problemática planteada, este enfoque ha permitido cuantificar la recopilación y el análisis de datos. En este sentido, era necesario saber la altura, calcular los metros cuadrados (m^2 .) y metros cúbicos (m^3 .) de espacio interno del templo “Santa Clara”, lo que ha servido para el cálculo de tiempo de reverberación (T_r), así como de la suma de todas las superficies fonoabsorbentes y por último el número de paneles de lana de roca necesarios para ser instalados.

El tipo de investigación es **experimental** debido a que se ha comparado los datos obtenidos de los cálculos descritos párrafo arriba; para determinar en primer lugar las causas de la resonancia acústica y mitigar la reverberación; y en segundo lugar los efectos de la utilización de a partir de prototipos paneles

absorbentes acústicos a escala reducida hechos de material reciclado, como respuesta a los efectos de los fenómenos acústicos en estudio. Con lo que se tiene como resultado una relación entre la causa y el efecto de la situación, o sea, la hipótesis queda demostrada por medio de la experimentación.

La técnica que ha permitido la recolección de datos cuantitativos, es la **observación**, como técnica de investigación, y ha consistido en observar atentamente hecho de la resonancia acústica y la consecuente reverberación, para luego tomar información y registrarla para su posterior análisis y estudio.

En éste sentido las herramientas de investigación empleadas son: sonómetros, analizador de frecuencias y calibrador acústico. Otra técnica es la exploración bibliográfica que ha permitido recopilar información ya existente sobre el objeto de estudio tema o problema, para tener las bases teóricas.

Metodología proyectual

Desde la metodología de Bruno Munari se modifican algunos puntos de su método proyectual, esto en función de las necesidades específicas de la presente investigación. En el entendido, según este autor, este método debe traducirse en una herramienta útil para el diseñador – en este caso el diseño de un prototipo de panel absorbente acústico- y no debe ser algo controversial, asimismo podrá ser modificado funcionalmente para mejorar el proceso del diseño (Munari, 2010).

Aplicando esta metodología, se parte de la determinación de un problema específico lo que implica valorar la complejidad del mismo, en este caso la mitigación de la resonancia acústica para evitar reverberación del sonido. Luego para su estudio y desglose es necesario recopilar y analizar los datos, entonces, se examina la resonancia por medio de un estudio acústico en el templo, lo que permite descubrir el origen de la resonancia acústica en el lugar y basar la información sobre materiales absorbentes, difusores y reflectivos; con lo que se obtienen datos y propiedades acústicas sobre los materiales reciclados disponibles para determinar qué materiales son óptimos para experimentar.

La creatividad comienza con el diseño de una solución apropiada para lo cual se selecciona los materiales y la tecnología a utilizar, se realizan los prototipos que son cinco paneles absorbentes acústicos contruidos a partir de material reciclado, la siguiente fase es la experimentación con distintos paneles hechos de materiales absorbentes reciclados que tengan una buena densidad y absorción del sonido y se verifica su funcionalidad. La experimentación supone prueba – error y el consecuente replanteo de los pasos anteriores. (Munari, 2010)

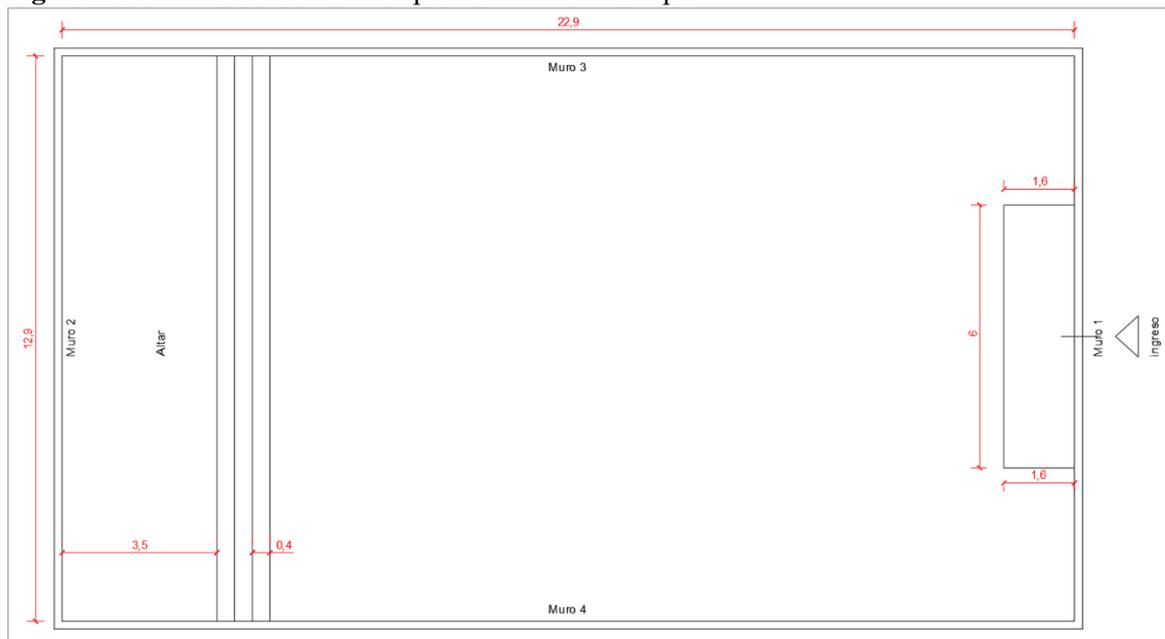
El orden de los pasos que plantea Murani pueden ejecutarse en un orden basado en la experimentación, esto permite trazar ciertos lineamientos que optimizan el resultado, facilita el camino con el mínimo esfuerzo. (Munari, 2010)

Partido del Proyecto — Intervención

Cálculo de reverberación en el templo “Santa Clara”

Cálculo de los m² del espacio interno del templo

Figura 6 : Cálculo de los m² del espacio interno del templo



Nota: La siguiente gráfica refleja las diferentes medidas de las paredes, los datos métricos sirven para calcular los m². de la planta principal.

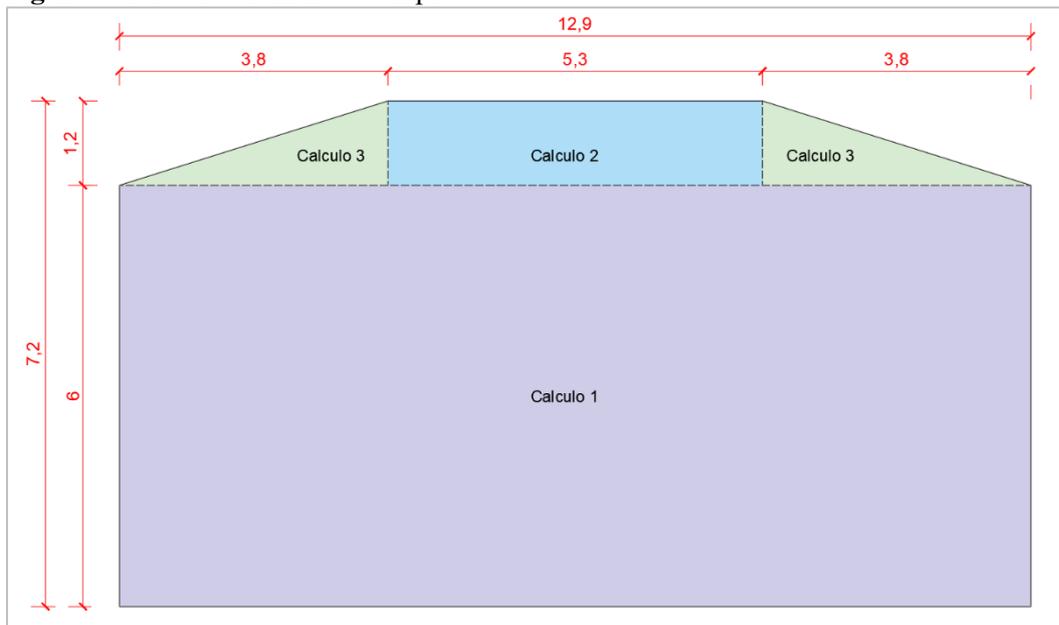
Fuente: elaboración propia Grupo BIOMA

Para poder hacer el cálculo de reverberación en el templo “Santa Clara” ha sido necesario trabajar en el lugar y proceder a la medición de los muros por la parte interior de la planta principal con lo que se puede calcular los metros cuadrados (m².) de la planta principal y así obtener datos para el cálculo del tiempo de reverberación (Tr) del lugar a ser intervenido (**figura 6**).

En la **figura 7** a continuación, se ilustra, como se ha procedido para obtener el volumen (m³) total del lugar donde se llevan a cabo las ceremonias religiosas y acogen a los visitantes (feligreses), este trabajo ha consistido en dividir el corte del espacio en cuatro (4) partes, dos en forma rectangular y dos en forma de triángulo, con lo que se realiza tres (3) cálculos: el primero y segundo del volumen de un prisma rectangular y el tercer cálculo del volumen de un prisma triangular con dos fórmulas diferentes.

Cálculo volumen del templo

Figura 7 Cálculo volumen del templo



Nota: Se grafica los cálculos realizados para obtener el volumen (m^3) total del lugar donde se llevan a cabo las ceremonias religiosas.

Fuente: elaboración propia Grupo BIOMA.

Calculo 1: Volumen de un prisma rectangular (V_{pr1}):

$$V_{pr1} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{altura}$$

$$V_{pr1} = 22.90 \text{ [m]} \times 12.90 \text{ [m]} \times 6.00 \text{ [m]}$$

$$V_{pr1} = 1772.46 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo 2: Volumen de un prisma rectangular (V_{pr2})

$$V_{pr2} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{altura}$$

$$V_{pr2} = 22.90 \text{ [m]} \times 5.3 \text{ [m]} \times 1.2 \text{ [m]}$$

$$V_{pr2} = 145.64 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo 3: Volumen de un prisma triangular (V_{pt})

1. Calcular el área del prisma triangular (A_{pt}):

$$A_{pt} = b \times h / 2$$

$$A_{pt} = 3.8 \text{ [m]} \times 1.2 \text{ [m]} / 2$$

$$A_{pt} = 4.56 \text{ [m}^2\text{]} / 2$$

$$A_{pt} = 2.28 \text{ [m}^2\text{]}$$

2. Calcular el volumen del prisma triangular

$$V_{pt1} = A \times h$$

$$V_{pt1} = 2.28 \text{ [m}^2\text{]} \times 22.90 \text{ [m]}$$

$$V_{pt1} = 52.20 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo 4: Cálculo Altar – Volumen Prisma rectangular (V_{pr})

$$V_{pr3} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{altura}$$

$$V_{pr3} = 22.90 \text{ [m]} \times 3.5 \text{ [m]} \times 0.6 \text{ [m]}$$

$$V_{pr3} = 48.09 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo 5: Suma de todos los resultados sin tomar en cuenta el cálculo 4 (V_{pr3})

Cálculo 1(V_{pr1}) + Cálculo 2 (V_{pr2}) + Cálculo V3 (V_{pt}) + Cálculo V3 (V_{pt})

$$1772.50 \text{ [m}^3\text{]} + 145.60 \text{ [m}^3\text{]} + 52.20 \text{ [m}^3\text{]} = 2022.5 \text{ m}^3.$$

Cálculo 6: Volumen total (VT)

Volumen total (VT)= Cálculo 5 – Cálculo 4

$$VT = 2022.5 \text{ [m}^3\text{]} - 48.09 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$VT = 1974.40 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo de la suma de todas las superficies fonoabsorbentes

Cálculo de las superficies

Área de Piso: $A_p = \text{ancho} \times \text{largo}$

$$A_p = 12.9 \text{ [m]} \times 22.90 \text{ [m]}$$

$$A_p = 259.41 \text{ [m}^2\text{]}$$

Área de Techo 1: $A_{t1} = \text{ancho} \times \text{largo}$

$$A_{t1} = 5.30 \text{ [m]} \times 22.90 \text{ [m]}$$

$$A_{t1} = 259.41 \text{ [m}^2\text{]}$$

Área de Techo 2: $A_{t2} = \text{ancho} \times \text{largo}$

$$A_{t2} = 3.16 \text{ [m]} \times 22.90 \text{ [m]}$$

$$A_{t2} = 72.40 \text{ [m}^2\text{]}$$

Área de Techo 3: $A_{t3} = \text{ancho} \times \text{largo}$

$$A_{t3} = 3.16 \text{ [m]} \times 22.90 \text{ [m]}$$

$$\mathbf{At3 = 72.40 [m^2]}$$

Área de muro 1 y 2:

Área Cálculo 1: **Am1 = ancho x largo**

$$\mathbf{Am1 = 6.00 [m] x 12.90 [m]}$$

$$\mathbf{Am1 = 77.4 [m^2]}$$

Área Cálculo 2: **Am2 = ancho x largo**

$$\mathbf{Am2 = 1.20 [m] x 5.30 [m]}$$

$$\mathbf{Am2 = 3.36 [m^2]}$$

Área Cálculo 3: **Am3 = ancho x largo**

$$\mathbf{Am3 = 1.20 [m] x 3.8 [m]}$$

$$\mathbf{Am3 = 4.56 [m^2]}$$

Área total muro 1 y 2 = **Área Cálculo 1 (Am1) + Área Cálculo 2 (Am2) + Área Cálculo 3 (Am3) +
Área Cálculo 3 (Am3)**

$$\mathbf{Área de muro 1 y 2 = 77.4 [m^2] + 3.36 [m^2] + 4.56 [m^2] + 4.56 [m^2]}$$

$$\mathbf{Área de muro 1 y 2 = 89.88 [m^2]}$$

Área de muro 3 y 4: = **ancho x largo**

$$\mathbf{Área de muro 3 y 4 = 6 [m] x 22.90 [m]}$$

$$\mathbf{Área de muro 3 y 4 = 137.4 [m^2]}$$

Resultado de cálculo de las superficies

Área de Piso (Ap):

$$\mathbf{Ap = 259.41 [m^2]}$$

Área de Techo (AT):

$$\mathbf{AT = At1 + At2 + At3}$$

$$\mathbf{AT = 259.41 [m^2] + 72.40 [m^2] + 72.40 [m^2]}$$

$$\mathbf{AT = 404.20 [m^2]}$$

Área de muro:

$$\mathbf{AM = Área de muro 1 y 2 + Área de muro 3 y 4}$$

$$\mathbf{AM = 89.88 [m^2] + 137.4 [m^2]}$$

$$\mathbf{AM = 227.28 [m^2]}$$

Cálculo de áreas con el coeficiente de los materiales

[m²] x coeficiente de absorción del material específico (banda de frecuencia 500)

$$\text{Piso de azulejo: } 295.40 [m^2] \times 0.02 = \mathbf{5.9 [m^2]}$$

$$\text{Techo de ladrillo con yeso: } 404.20 [m^2] \times 0.02 = \mathbf{8.08 [m^2]}$$

$$\text{Muros de ladrillo con yeso: } 227.28 [m^2] \times 0.02 = \mathbf{4.54 [m^2]}$$

Suma de todas las superficies fonoabsorbentes

Piso de azulejo + Techo de ladrillo con yeso + Muros de ladrillo con yeso=

$$5.90 [m^2] + 8.08 [m^2] + 4.54 [m^2]$$

Suma de todas las superficies fonoabsorbentes= 18.52 [m²]

Tiempo de reverberación (Tr)

Tr = 0.161 x volumen total [m³] / suma de superficie absorbente [m²]

$$\text{Tr} = 0.161 \times 1974.40 [m^3] / 18.52 [m^2]$$

$$\text{Tr} = \mathbf{17.16 [s]}$$

Cálculo de reverberación en el templo “Santa Clara”

Calcular los metros cúbicos [m³] del espacio interno del templo

Cálculo 4: cálculo escenario

Volumen de un prisma rectangular (V_{pr}): largo x ancho x altura

$$\mathbf{V_{pr} = 22.90 [m] \times 3.5 [m] \times 0.6 [m]}$$

$$\mathbf{V_{pr} = 48.09 [m^3]}$$

Cálculo 5: Suma de todos los resultados sin tomar en cuenta el cálculo 4

Cálculo V1 + Cálculo V2 + Cálculo V3 + Cálculo V3 =

$$1772.50 [m^3] + 145.60 [m^3] + 52.20 [m^3] + 52.20 [m^3]$$

Cálculo V1 + Cálculo V2 + Cálculo V3 + Cálculo V3 = 2022.5 [m³]

Cálculo 6: Volumen total (VT)- Altar

$$\mathbf{VT = 2022.5 [m^3] - 48.09 [m^3]}$$

$$\mathbf{VT = 1974.40 [m^3]}$$

Cálculo de la suma de todas las superficies fonoabsorbentes

a. Cálculo de las superficies

Área de Piso (AP):

Ap = ancho x largo

Ap = 12.9 [m] x 22.90 [m]

Ap = 259.41 m²

Área de Techo (At1):

At1 = ancho x largo

At1 = 5.30 [m] x 22.90 [m]

At1 = 259.41 [m²]

Área de Techo 2 (At2):

At2 = ancho x largo

At2 = 3.16 [m] x 22.90 [m]

At2 = 72.40 [m²]

Área de Techo 3 (At3):

At3 = ancho x largo

At3 = 3.16 [m] x 22.90 [m]

At3 = 72.40 [m²]

Área de muro 1 y 2:

→ Área Cálculo 1 (Am1):

Am1 = ancho x largo

Am1 = 6.00 [m] x 12.90 [m]

Am1 = 77.4 [m²]

→ Área Cálculo 2 (Am2):

Am2 = ancho x largo

Am2 = 1.20 [m] x 5.30 [m]

Am2 = 3.36 [m²]

→ Área Cálculo 3 (Am3):

Am3 = ancho x largo

Am3 = 1.20 [m] x 3.8 [m]

Am3 = **4.56 [m²]**

• Área total muro 1 y 2:

Área de muro 1 y 2 = Am1 + Am2 + Am3 + Am3

Área de muro 1 y 2 = 77.4 [m²] + 3.36 [m²] + 4.56 [m²] + 4.56 [m²]

Área de muro 1 y 2 = 89.88 [m²]

• Área de muro 3 y 4:

Área de muro 3 y 4 = ancho x largo

Área de muro 3 y 4 = 6 [m] x 22.90 [m]

Área de muro 3 y 4 = 137.4 m²

b. Superficie de muro restando la superficie de los 80 paneles absorbentes.

Área de muro - Área de 80 paneles = 227.28 [m²] - 57.6 [m²]

Área de muro - Área de 80 paneles = 169.68 [m²]

c. Resultado de cálculo de las superficies

Área de Piso Ap = 259.41 m²

Área de Techo At = 404.20 m²

Área de muro Am = 169.68 m²

Área de 80 paneles = 57.6 m²

d. Cálculo de áreas con el coeficiente de los materiales

m² x coeficiente de absorción del material específico (banda de frecuencia 500)

Piso de azulejo: 295.40 [m²] x 0.02 = **5.9 [m²]**

Techo de ladrillo con yeso: 404.20 [m²] x 0.02 = **8.08 [m²]**

Muros de ladrillo con yeso: 169.68 [m²] x 0.02 = **3.39 [m²]**

Paneles lana de Roca forrados con tela de yute: 57.6 [m²] x 0.80 = **45.28 [m²]**

Suma de todas las superficies fonoabsorbentes

Piso de azulejo + Techo de ladrillo con yeso + Muros de ladrillo con yeso + Paneles lana de Roca forrados con tela de yute =

$$5.90 \text{ [m}^2\text{]} + 8.08 \text{ [m}^2\text{]} + 3.39 \text{ [m}^2\text{]} + 45.28 \text{ [m}^2\text{]} = \mathbf{62.65 \text{ [m}^2\text{]}}$$

Tiempo de reverberación (Tr)

$$\mathbf{Tr} = 0.161 \times \text{volumen total [m}^3\text{]} / \text{suma de superficie absorbente [m}^2\text{]}$$

$$\mathbf{Tr} = 0.161 \times 1974.40 \text{ [m}^3\text{]} / 62.65 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\mathbf{Tr} = \mathbf{5.07[s]}$$

Al reemplazar la superficie de los muros con 80 paneles absorbentes reducimos la resonancia acústica en el interior del templo de 17.16 [s] a 5.07 [s] = Tr.

Área de 80 paneles:

Área de 1 pieza = ancho x largo

$$\mathbf{Área de 1 pieza = 1.20 \text{ [m]} \times 0.6 \text{ [m]}}$$

$$\mathbf{Área de 1 pieza = 0.72 \text{ [m}^2\text{]}}$$

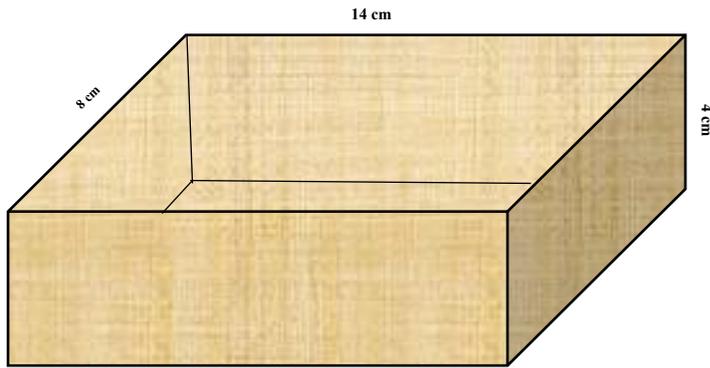
$$\mathbf{Área de 80 paneles = 0.72 \text{ [m}^2\text{]} \times 80 \text{ piezas}}$$

$$\mathbf{Área de 80 paneles = 57.6 \text{ [m}^2\text{]}}$$

Panel prototipo con materiales reciclados

La **Figura 8 Caja de cartón**, está hecha a escala reducida de un panel, mide 4cm x 14 cm x 8 cm con un volumen de 448 cm³ después de pesar la masa equivalente de todos los materiales experimentados, se calcula la densidad.

Figura 8: Caja de cartón



Nota: Detalle caja de cartón a escala reducida.
Fuente: Elaboración propia – Grupo BIOMA

Volúmen:

$$V = 14 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 448 \text{ cm}^3$$

Densidad:

$$d = \frac{m}{v}$$

Calculo densidad experimentación con lámina de esponja:

$$d = \frac{23 \text{ gr}}{448 \text{ cm}^3} = 0.051 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Calculo densidad experimentación con lámina de esponja número 4 de 3 cm.

$$d = \frac{8 \text{ gr}}{448 \text{ cm}^3} = 0.018 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Calculo densidad experimentación con botellas de pet.

$$d = \frac{32 \text{ gr}}{448 \text{ cm}^3} = 0.071 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Calculo densidad experimentación con plástico de botellas pet número 3 triturados con esponja triturada del número 4.

$$d = \frac{15 \text{ gr}}{448 \text{ cm}^3} = 0.033 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Calculo densidad experimentación con botellas pet y tiras de algodón.

$$d = \frac{25 \text{ gr}}{448 \text{ cm}^3} = 0.056 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Variantes

El análisis puede ir variando de acuerdo a la cantidad y al tamaño de paneles que se desee instalar.

Demostración de la hipótesis proyectual: Paneles absorbentes acústicos con material reciclado

La experimentación con cinco paneles absorbentes acústicos hechos a escala reducida y contruidos con diferentes materiales reciclados, se ha podido calcular la densidad ideal para que sea replicado a escala natural.

Por lo tanto, tres de los cinco materiales reciclados con los que se ha construido el prototipo panel absorbente acústico y se ha experimentado, son: 1) Lamina de esponja envuelta con tela poliéster, 2) plástico de botellas triturado y 3) plástico de botella pet triturado con tiras de algodón; con los cuales se ha obtenido buenos resultados alcanzando una mayor densidad. En el subtítulo: “**Panel prototipo con materiales reciclados**” se comprueba esta hipótesis haciendo la operación de las formulas.

CONCLUSIONES

En la investigación realizada se puede evidenciar el problema acústico que comprende al templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto, se ha evidenciado un fenómeno de resonancia acústica en el espacio interno que provoca reverberación del sonido — que se conoce coloquialmente como “eco” —, lo que ocasiona que las predicas y sermones que pronuncia el clérigo (“sacerdote”) no llega de manera clara y legible a los sentidos auditivos de los feligreses.

En base a los estudios y experimentación que se ha realizado y que se plasman en los objetivos específicos, se tiene como resultado la proposición de instalar paneles absorbentes acústicos con materiales reciclados, como consecuencia se tiene resultados favorables, para lo cual se ha cumplido en realizar los cálculos de los metros cuadrados (m^2 .) y metros cúbicos (m^3 .) de espacio interno de la templo “Santa Clara”, que ha permitido realizar el cálculo de reverberación, tiempo de reverberación, así como de la suma de todas las superficies fonoabsorbentes.

Después del proceso de estudio acústico – arquitectónico aplicados al templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto, se logra proponer la aplicación de paneles absorbentes acústicos con materiales reciclados, para mitigar la resonancia acústica y evitar la reverberación del sonido en el templo “Santa Clara” de la ciudad de El Alto.

En consecuencia, se ha examinado la resonancia, se ha logrado descubrir el origen de la misma, se cumple en analizar cuál es la mecánica de la acústica, se sienta las bases de la información a cerca de materiales absorbentes (material reciclado), se alcanza en obtener datos y propiedades acústicas sobre los materiales reciclados disponibles para construir un prototipo a escala reducida de un panel absorbente acústico a partir de materiales reciclados; un paso antes de generar un prototipo a escala natural de panel absorbente acústico es que se ha experimentado con distintos paneles a escala reducida construido con materiales reciclados que tengan una buena densidad y absorción del sonido, de esta experimentación se concluye que los tres prototipos en escala reducida que alcanzaron una mayor densidad fueron: 1) lámina de esponja número 4 de 3 cm envuelta con la tela polar de poliéster con una densidad de 0,051 gr/cm³, 2) plástico de botellas pet número 3 triturados con una densidad de 0,071 gr/cm³ y 3) plástico triturado de botella pet número 3 con tiras de algodón de 2 cm con una densidad de 0,056 gr/cm³, en conclusión, la densidad y porosidad de éstos tres prototipos a escala reducida de paneles absorbentes acústicos es adecuada para una buena absorción del sonido y llega a un rango ideal que es entre 40 y 70 Kg/m³ o su equivalente 0.040 gr/cm³ y 0.070 gr/cm³.

Si bien los cálculos son favorables aún son hipotéticos por lo que se tendrían que elaborar y colocar paneles absorbentes acústicos a escala natural en base al prototipo y organización en los muros del templo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ávila Gonzales, S. (2013). Estudio acustico de la iglesia Santa Maria del Castillo [proyecto fin de carrera]. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 5 de mayo de 2023, de https://oa.upm.es/21332/1/PFC_SERGIO_AVILA_GONZALEZ.pdf

Boschi, C. E. (octubre de 2008). Método para medir el tiempo de reverberación en recintos. (U. T. Nacional, Ed.) Proyecto Leonardo, 3(1), 1 - 10. Recuperado el 21 de abril de 2023, de http://www1.frm.utn.edu.ar/laboratoriodeacustica/Metodo_experimental_para_medir_el_TR6_0.pdf

³ “Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m³.”
<https://www.cortinasacusticas.net/2018/08/06/la-densidad-de-los-materiales-acusticos/#:~:text=Desde%20un%20punto%20de%20vista,caso%20los%20100%20Kg%20m3.>

- Casas, J. N., Sendra Salas, J. J., & Zamarreño García, T. (1997). El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación. Sevilla, España: Instituto Universitario de la Ciencias de la Construcción. Recuperado el 21 de abril de 2023, de https://www.google.com.bo/books/edition/El_problema_de_las_condiciones_ac%C3%BAstica/MVIsEk_D6TwC?hl=es-419&gbpv=1&kptab=overview
- Cortinas para Aislamiento Acústico. (2023). Cortinas para Aislamiento Acústico. Recuperado el 10 de octubre de 2023, de <https://www.cortinasacusticas.net/2018/08/06/la-densidad-de-los-materiales-acusticos/#:~:text=Desde%20un%20punto%20d%20e%20vista,caso%20los%20100%20Kg%2Fm3.>
- Daumai i Domènech, F. (2002). La arquitectura del sonido. TECTONICA, 28 - 39.
- de Barrio Mora, J. I. (2008). Sistemas de predicción de parámetros que caracterizan el campo sonoro en iglesias [tesis doctoral]. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://oa.upm.es/5752/>
- Domingo, A. M. (2022). Apuntes de Acústica. España: Author. Recuperado el 24 de abril de 2023, de <https://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf#page=33&zoom=100,96,830>
- El Alto Bolivia. (14 de mayo de 2017). El Alto: población total y por distritos: El Alto Bolivia. Obtenido de El Alto Bolivia Web cite: <https://elaltobo.com/el-alto-poblacion-total-y-por-distritos/>
- Iglesias Mouteira, R. (2005). Instalación de equipos y sistemas audiovisuales y multimedia. (1ra ed.). España: Ideaspropias. Obtenido de https://www.google.com.bo/books/edition/Instalacion_de_Equipos_y_Sistemas_Audiov/jojJivxh42oC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Reverberaci%C3%B3n&pg=PA18&printsec=frontcover
- Maestro Jorge, V. M. (2016). Acondicionamiento acústico y refuerzo sonoro de la parroquia del Sabrado Corazón de Jesús [tesis pregrado]. México: Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Recuperado el 26 de abril de 2023, de [file:///C:/Users/biblioteca/Downloads/tesis_VMMJ%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/biblioteca/Downloads/tesis_VMMJ%20(1).pdf)
- McNamara, D. R. (2015). Cómo leer iglesias una guía sobre arquitectura eclesiástica (3ra. reimpresión, 2015 ed.). (J. L. Gonzáles García, Trad.) Madrid, España: AKAL S.A.

- Mena Sanchis, J. (2013). Diseño de aislamiento y acondicionamiento acústico de un local en planta baja para actuaciones de grupos rock situado en la población de Oliva (Valencia) [Tesis Maestría]. Gandia: Universidad Politécnica de Valencia Escuela Politécnica Superior de Gandia. Recuperado el 25 de abril de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33579/memoria.pdf?sequence=1>
- Munari, B. (2010). ¿Cómo nacen los objetos? (1ra ed.). Barcelona: Gustavo Gili.
- Payá, M. (1976). Aislamiento térmico y acústico. Marcelona, España: CEAC, S.A. .
- Roselló Vilarroig, G., & Marzo Diez, J. M. (2002). Introducción a la acústica arquitectónica. Fundamentos físicos. Acondicionamiento. Aislamiento. TECTONICA, 4 - 27.
- Traeder, V. (3 de agosto de 2016). La huella del “arquitecto de El Alto”: Deutsche Welle. Obtenido de Deutsche Welle Web site: <https://www.dw.com/es/la-huella-del-arquitecto-de-el-alto/a-19447238>