

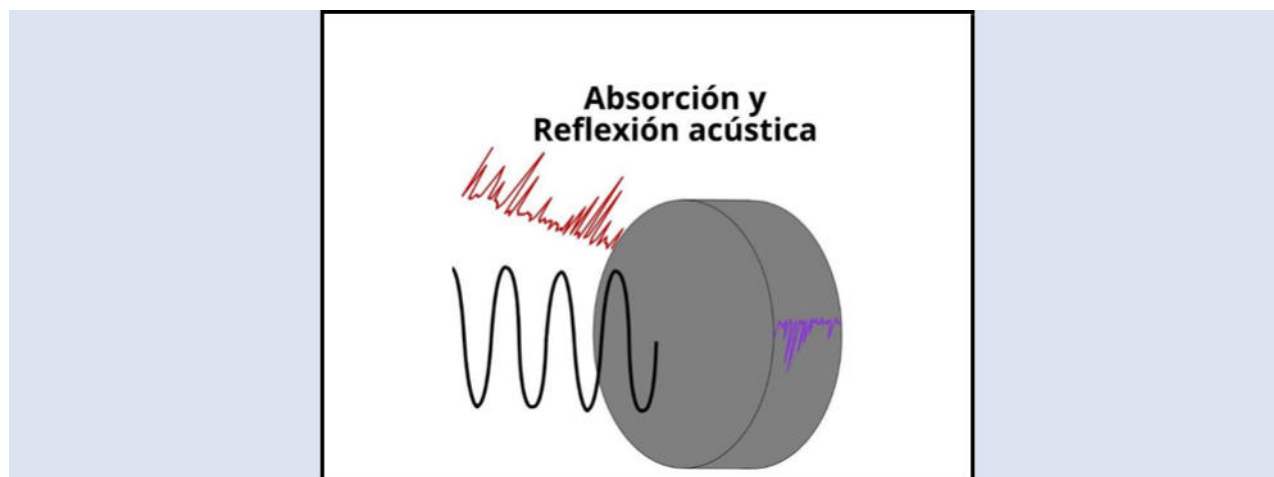
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DEL MORTERO CON REEMPLAZO PARCIAL DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

William Andrade^{1*}, Valentina Aya², Juan Castro²

1: Universidad Cooperativa de Colombia (UCC)

2: Universidad Surcolombiana (USCO)

*e-mail: william.andrade@campusucc.edu.co



RESUMEN

La contaminación por medio de residuos y de sonido resulta perjudicial para el bienestar y la salud de las personas, es por ello por lo que conceptos como aprovechamiento de residuos y confort acústico resuenan en la sociedad actual. La ceniza de cascarilla de arroz (RHA) ha pasado de ser un residuo a ser un material utilizado en diferentes sectores industriales, dentro de los principales se encuentra el reemplazo de material cementante debido a las propiedades que es capaz de otorgarle a las mezclas de concreto y mortero. En este estudio se evaluaron propiedades de resistencia a la compresión, sorcibilidad e impedancia acústica en mezclas de mortero, analizando estadísticamente 228 muestras divididas en diferentes ensayos para determinar un porcentaje de reemplazo parcial de cemento por RHA que mostrara un comportamiento similar o favorable respecto a los morteros de alta resistencia, obteniendo como resultado más favorable el 10% de reemplazo con una resistencia a la compresión de 24,935 MPa y un coeficiente de absorción acústica en los picos de resonancia (495 y 1445 Hz) de 0.9173 y 0.0549 respectivamente, concluyendo en la obtención de un material óptimo para aislar paredes acústicamente.

Palabras Clave: Ceniza, Arroz, RHA, Reemplazo, Compresión, Sorcibilidad, Impedancia, Acústica.

ASSESSMENT OF THE ACOUSTIC PROPERTIES OF MORTAR WITH PARTIAL RICE HUSK ASH REPLACEMENT

ABSTRACT

Pollution from waste and noise is detrimental to people's well-being and health, which is why concepts like waste utilization and acoustic comfort resonate in today's society. Rice husk ash (RHA) has transitioned from being a waste product to a material used in various industrial sectors, primarily as a substitute for cementitious material due to the beneficial properties it can provide to concrete and mortar mixes. This study evaluated compressive strength, sorptivity, and acoustic impedance properties in mortar mixes, statistically analyzing 228 samples across different tests to determine a partial cement replacement percentage with RHA that would exhibit similar or favorable behavior compared to high-strength mortars. The most favorable result was achieved with a 10 % replacement, showing a compressive strength of 24,935 MPa and acoustic absorption coefficients at resonance peaks (495 and 1445 Hz) of 0,9173 and 0,0549, respectively, concluding with the development of an optimal material for acoustic wall insulation.

Keywords: *Ash, Replacement, Compression, Sorcibility, Impedance, Rice, RHA*

1. INTRODUCTION

En el ámbito de la ingeniería civil y la ciencia de los materiales, el desarrollo de morteros y concretos con propiedades mejoradas respecto a los ejemplares convencionales, es un área de investigación que día tras día gana relevancia. La incorporación de aditivos y la optimización de mezclas son prácticas ya comunes actualmente, que buscan no solo mejorar sus características inherentes, sino también solucionar problemáticas que afectan tanto al sector constructivo como a otros campos y áreas de interés general, dando como resultado materiales más eficientes y sostenibles.

Aunque resulte un tema poco tratado e incluso pasado por alto, el asunto concerniente a los perjuicios ocasionados por la contaminación acústica ha suscitado una amplia denuncia por parte de numerosos fisiólogos pues su magnitud aumenta con relación al crecimiento urbano acelerado percibido en el tráfico vehicular y las actividades industriales y comerciales. Si bien no se hace pertinente profundizar en esta instancia en los aspectos médicos y las implicaciones del ruido en el organismo y el bienestar físico, resulta primordial resaltar que dichas consecuencias son ampliamente reconocidas, siendo la fatiga nerviosa y las molestias auditivas en diversas magnitudes las más comunes. Por esta razón la evaluación de las propiedades acústicas en los materiales adquiere un carácter esencial en el sector de la construcción, pues conlleva al uso de elementos que mejoren en el confort interior al reducir la transmisión de ruido entre áreas y aporten un valor agregado a la propiedad dentro del mercado inmobiliario al ofrecer una mayor calidad de vida a quien resida.

En segundo aspecto, ya es de conocer que, durante los últimos años, tanto la producción de cemento como los procesos agroindustriales han sido objeto de creciente preocupación debido a sus impactos ambientales. Por un lado, la producción de cemento se enfrenta a desafíos relacionados con la emisión de contaminantes atmosféricos, destacando especialmente el dióxido de carbono CO_2 . Por otro lado, la industria agrícola enfrenta confrontaciones relacionadas con la generación de subproductos o residuos que no pueden ser eficientemente aprovechados en sus sectores primarios. Estas problemáticas plantean importantes interrogantes sobre la sostenibilidad de estas actividades.

En el año 2019, la Environmental Protection Agency, agencia ejecutiva independiente del gobierno federal de los Estados Unidos, evaluó las intensidades de carbono directo para los productos intermedios y finales de las plantas de producción: clínker y cemento, las cuales funcionan como puntos de referencia para las emisiones de carbono de la industria. En este estudio, se reportó para el percentil 50 una emisión de 0,838 toneladas de CO_2 por tonelada de clínker y 0,776 toneladas de carbono por tonelada de cemento [1], esto debido a las reacciones químicas inherentes al proceso de combustión de la caliza, el consumo de energía y el uso de combustibles fósiles. De manera similar recientemente, otros autores [2], manifestaron que, aproximadamente, se producen anualmente 4,1 mil millones de toneladas métricas de cemento en todo el mundo, que representa alrededor del 8-10 % de las emisiones globales de CO_2 de origen antropogénico que pueden continuar en aumento. Por tanto, para atenuar de manera efectiva el impacto ambiental de la industria del cemento, es necesario disminuir la proporción o fracción activa de clínker en los cementos al 60 % de su valor actual para el año 2050 [3].

Para tratar de mitigar estas problemáticas, diversos investigadores se han centrado en analizar las características de los residuos agrícolas con el fin de buscar formas de que sean usados en la industria de la construcción, especialmente en su adición o sustitución parcial en las mezclas de concreto o mortero hidráulico debido a la importancia del material en dicho ámbito por su versatilidad, resistencia y durabilidad [4].

Colombia se posiciona como el tercer país con mayor producción de arroz en Suramérica, y considerando que el arroz es uno de los productos agrarios más consumidos en dicho territorio, resulta lógico que el proceso de producción de este cereal conlleve un notable índice de generación de residuos, especialmente la cascarilla de arroz al representar, aproximadamente, una quinta parte en peso del fruto recolectado. Según lo descrito por [5] en Colombia la producción de arroz está cercana a 2.1×10^6 toneladas por año y como consecuencia se generan cerca de 4×10^5 toneladas de cascarilla de arroz residualmente. Es por esto que el subproducto toma relevancia en recientes investigaciones, donde se ha dejado en evidencia su efectivo desempeño como material de reemplazo en la mejora de la

resistencia y durabilidad del concreto y el mortero gracias a las diversas propiedades fisicoquímicas que posee en estado calcinado, como lo es el dióxido de silicio SiO_2 .

El objeto de este artículo surge precisamente de todos los aspectos expuestos anteriormente, donde se propone la evaluación de mezclas de concreto y mortero con diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza de cascarilla de arroz (RHA), con la finalidad de destacar aquel que ofrezca una relación óptima entre sus propiedades acústicas y mecánicas dentro de los estándares establecidos. Esto servirá como punto de partida para investigaciones posteriores, ofreciendo una contribución crucial al desarrollo de alternativas en la fabricación de elementos constructivos, así como en la expansión del conocimiento sobre las propiedades acústicas de los materiales que serán de vital importancia para su consideración en futuros proyectos constructivos.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1. Cemento

El cemento empleado en esta investigación fue el cemento de uso general de la marca ARGOS “las especificaciones del cemento gris de uso general cumplen con los valores de la norma técnica colombiana NTC 121 para tipo UG [6]. Este estándar garantiza que el cemento sea adecuado y óptimo para una amplia gama de aplicaciones en la construcción.

2.1.2. Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz definida como RHA (por sus siglas) se puede definir como material puzolánico producto de desperdicio natural con un alto contenido en sílice, alrededor de un 95 % [7], su producción se origina debido al aprovechamiento de un residuo del sector agrícola, la cascarilla de arroz, en su calcinación como biomasa y su aprovechamiento como combustible alternativo en el sector energético [8].

2.1.3. Agregado fino

El agregado fino que se utilizó es una arena mal gradada (SP) con coeficiente de curvatura de 1,2 y coeficiente de uniformidad de 3. El módulo de finura obtenido fue de 2,2 se describe por la curva granulométrica (Ver Figura 1).

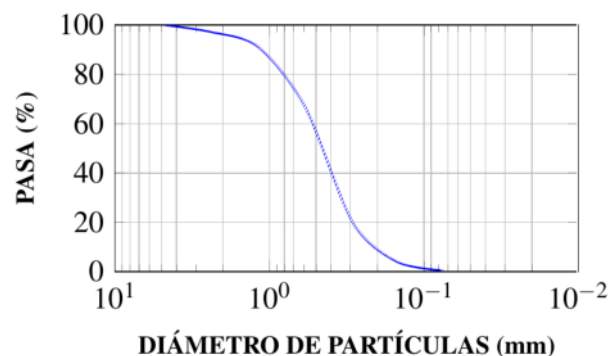


Figura 1. Curva granulométrica del agregado fino

2.2 Metodología

2.2.1. Grupos de estudio

Debido a la distribución de los grupos de prueba para la realización del ensayo, se dispone del uso de las siguientes abreviaturas:

- Pt: Patrón, mortero sin porcentaje de reemplazo (grupo de control).
- R10: Mortero con porcentaje de reemplazo del 10 % (Grupo de estudio 1)
- R15: Mortero con porcentaje de reemplazo del 15 % (Grupo de estudio 2).
- R20: Mortero con porcentaje de reemplazo del 20 % (Grupo de estudio 3).
- t: Resistencia temprana a la compresión (14 días).
- u: Resistencia última a la compresión (28 días).

2.2.2. Diseño de mezcla

Teniendo en cuenta la norma NTC 220 [9], se definieron las cantidades de los materiales para la obtención de la mezcla para la fundición de los cubos de ensayo. Teniendo en cuenta las condiciones y necesidades de la presente investigación, se tuvo en cuenta la dosificación correspondiente a 6 cubos por mezcla (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Diseño de mezcla calculado por grupo de estudio para 6 cubos basado en la dosificación de la NTC 220.

Grupo	Material	Und	6 cubos
Pt	Cemento	g	500
	Arena	g	1370
	Agua	ml	242
	RHA	g	-
R10	Cemento	g	450
	Arena	g	1370
	Agua	ml	242
	RHA	g	50
R15	Cemento	g	425
	Arena	g	1370
	Agua	ml	242
	RHA	g	75
R20	Cemento	g	400
	Arena	g	1370
	Agua	ml	242
	RHA	g	100

Para la obtención de la ceniza de cascarilla de arroz se llevó a cabo un proceso de recolección y posterior incineración con un rango de tiempo y temperatura controlados utilizando una mufla, dispositivo de calentamiento de precisión. Teniendo en cuenta lo dictado por [10] para la generación de sílice amorfa, este procedimiento se llevó a cabo por un periodo de 2 h a una temperatura de 650 °C, dando lugar a una calcinación total que potencie sus propiedades puzolánicas y que asegure la ausencia de contaminación o alteración en el material.

Posteriormente, la ceniza fue triturada hasta que pudiese pasar a través del tamiz de malla 200 (75 μm), garantizando así una granulometría similar a la del cemento.

2.2.3. Geometría de las muestras

Teniendo en cuenta las cantidades de materiales señalados para cada grupo de estudio, se continuó con la preparación del mortero según se señala en la norma NTC 112 [11] iniciando con la adición de los componentes del mortero, a excepción del agua, en el recipiente de la mezcladora, ejecutando el proceso de mezclado con los tiempos según lo previsto por la norma antes mencionada. Una vez se contó con la mezcla de mortero, esta fue llevada a la mesa de flujo para la realización del ensayo de fluidez

siguiendo las pautas establecidas en la norma NTC 111 [12].

Si la mezcla era aprobada según su fluidez se continuaba con el llenado de los moldes respectivos según el ensayo en cuestión de la muestra de acuerdo con lo indicado en [9], esto corresponde a un procedimiento de control. Para los ensayos de compresión y sorcibilidad, se usaron formaletas de 50 mm de lado como se muestra en la Figura 2. Para el ensayo de impedancia acústica, se emplearon formaletas cilíndricas con bases de diámetro coincidente con el diámetro interior del tubo de impedancia y una altura de 2 cm.

Una vez llenos los moldes esperó por 24 h, luego de transcurrido este tiempo se llevó a cabo el desencofre de las muestras las cuales fueron etiquetadas según el grupo de estudio y la hora y fecha de fundición y posteriormente sumergidas en una piscina saturada con cal en una concentración de 2 g/L [9].

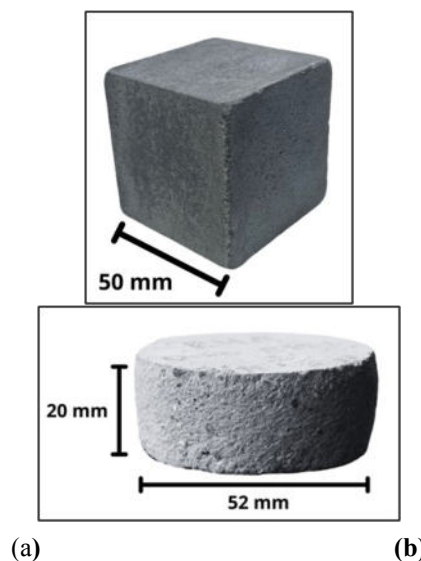


Figura 2. (a) Muestra para ensayos de compresión y sorcibilidad (b) Muestra para ensayo de impedancia acústica.

2.2.4. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó en 2 instancias, a los 14 días de edad determinándose como resistencia temprana, y a los 28 días de edad nombrándose resistencia última. Las pruebas de compresión se llevaron a cabo según lo especificado en [9] empleando una máquina de ensayo de compresión calibrada. Las muestras de mortero se

elaboran con una resistencia de diseño de 22,5 MPa correspondiente al mortero tipo H, categoría regulada en la norma que demanda el mayor valor en esta propiedad.

Los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión se reunieron en tablas resumen según la edad de la muestra a la que fue sometida en el momento del ensayo. Para la resistencia temprana, se realizó un análisis descriptivo haciendo uso de cálculos de medidas de tendencia central y se compararon dichos resultados, buscando identificar el porcentaje de desarrollo de resistencia del mortero a los 14 días de curado a través de la comparación de la resistencia temprana con la resistencia final del mismo grupo de estudio. Para la resistencia última, se verificó si los datos de los ensayos son representativos mediante un análisis de varianza. Una vez aprobados, se compararon los grupos de estudio (R10^u, R15^u y R20^u) con el grupo de control (Pt^u) usando el programa para comparar muestras independientes y finalmente, se realizó una comparación de medias y se probó la hipótesis nula, que establece no existe variabilidad significativa entre las medias de los grupos de estudio que se comparan.

2.2.5. Sorcibilidad

Teniendo en cuenta el procedimiento indicado en la norma ASTM C1580-20 [13], se determinó la susceptibilidad del mortero a la penetración del agua mediante el ensayo de sorcibilidad, esencial para reconocer la calidad y durabilidad de los materiales expuestos a condiciones similares a las reales. Para esto, las muestras cúbicas se secaron a 110 ± 5 °C durante tres días hasta alcanzar masa constante, eliminando la humedad residual. Luego, se reposaron en bolsas plásticas con cierre hermético durante cinco días para estabilizar su temperatura y humedad. Tras aplicar sellante en todos los lados excepto el de contacto, se sumergieron en agua a temperatura controlada en intervalos de 60 s a 6 días para medir la absorción progresiva.

Una vez obtenidos los resultados, se realizó una tabla resumen de los tiempos y masas registradas para posteriormente calcular la absorción haciendo uso de la ecuación (1) según lo señalado en la norma ASTM C618 [14].

$$I = \frac{\Delta m}{a \cdot d} \quad (1)$$

Donde I es la absorción, Δm es el diferencial entre la masa inicial sin exposición al agua y la masa en función del tiempo, a es el área expuesta en mm² y d es la densidad del agua en g/mm³.

Para comparar el rendimiento a lo largo del tiempo, se graficó la absorción (I) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($s^{1/2}$) en un gráfico de dispersión. Según [14], los datos se dividen en dos subgrupos: absorción inicial (0 a 6 h) y absorción secundaria (día 1 hasta el final). Posteriormente, se aplica regresión lineal a cada subgrupo para obtener una línea de tendencia cuya pendiente indicará su tasa de absorción. Para que este valor sea aprobado, la norma exige que el coeficiente de determinación (r^2) calculado sea al menos 0,95, que representa la linealidad de los datos. Finalmente, se comparan las tasas de absorción entre los grupos de estudio para el análisis de la propiedad en el material.

2.2.6. Desempeño acústico

La norma empleada en la realización del ensayo destinado a la determinación del coeficiente de absorción e impedancia acústica de las muestras es la ISO 10534 Parte 2: *Método de función de transferencia*. Este procedimiento emplea un tubo de impedancia que mide las presiones acústicas en dos ubicaciones fijas cercanas al objeto de prueba, para el posterior cálculo de la función de transferencia acústica compleja $H12$ [15].

Se optó por la realización del ensayo una vez las probetas alcanzaron su resistencia máxima (28 días), pues una edad más temprana no reflejaría adecuadamente la resistencia que el material desarrollará en condiciones reales de uso.

Tras finalizada la preparación de las muestras, se montó el equipo de prueba [15] y se sometió a pruebas de verificación de temperatura y de relación señal-ruido que pudiesen eliminar posibles fuentes de error. El esquema del montaje es mostrado en la Figura 3.

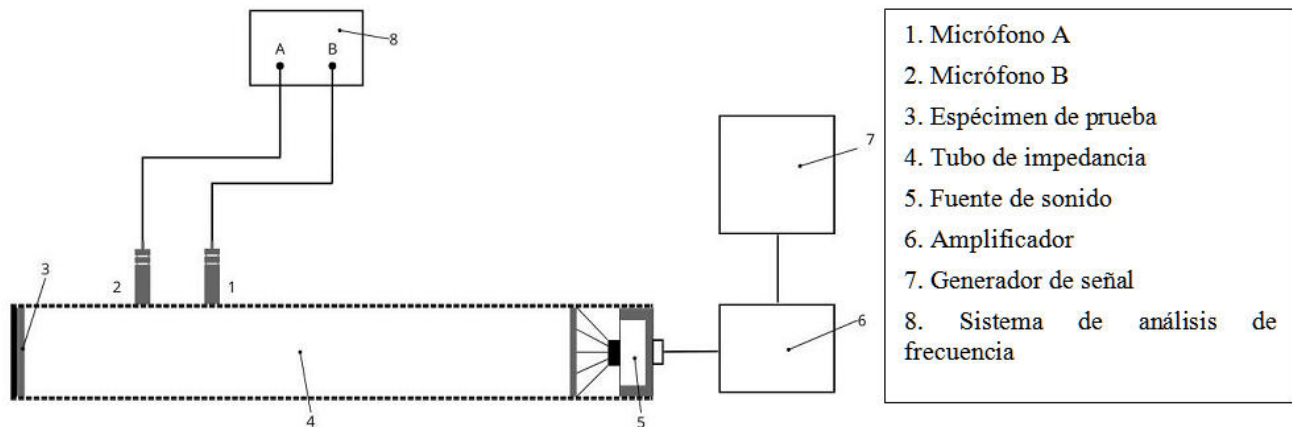


Figura 3. Esquema de montaje del equipo de prueba [15].

Cuando se emplea la técnica de dos micrófonos, siendo el caso de la presente investigación, la norma indica que es esencial corregir los datos de la función de transferencia, pues pueden existir discrepancias entre los canales. Para ello, previo al inicio de la serie de pruebas, se realizó un procedimiento de calibración [15].

Este procedimiento consiste en la colocación de una muestra de calibración especial en el tubo y posterior cálculo de las funciones de transferencia: H_{12}^I (medición con la configuración estándar) y H_{12}^H (medición con los micrófonos intercambiados) utilizando las mismas expresiones matemáticas

para ambos casos. Con ello, se obtiene el factor de calibración del tubo H_c mediante la ecuación (2).

$$H_c = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^H} \right)^{\frac{1}{2}} = |H_c| e^{j\phi} \quad (2)$$

Luego de ser calibrado el equipo, se situó la probeta del grupo de control (patrón, Pt) en el soporte teniendo presente que se ajuste sin compresión excesiva y se procedió a dar inicio al ensayo (Figura 4).



Figura 3. Prueba de impedancia acústica con el grupo de control (Pt).

Una vez emitidas las ondas de sonido del rango de trabajo de forma dirigida y posterior lectura de las presiones acústicas, el equipo de procesamiento de señales FFT es el encargado de calcular la función de la transferencia compleja sin corregir $\hat{H}_{12}$ y

corregida H_{12} para cada frecuencia haciendo uso de las ecuaciones (3) y (4) indicadas en la [15].

$$\hat{H}_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = |H_{12}| e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (3)$$

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\tilde{H}_{12}}{H_c} \quad (4)$$

Dónde:

- H_r es la parte real de H_{12} .
- H_i es la parte imaginaria de H_{12} .
- S_{12} (espectro cruzado) es el producto $P_1 \cdot P_2$ determinado a partir de las presiones acústicas P_1 y P_2 en dos posiciones del micrófono.
- S_{11} (auto espectro) es el producto $P_1 \cdot P_1$ determinado a partir de la presión acústica P_1 en una única posición del micrófono.

Finalmente, se calculó el factor de reflexión en incidencia normal r el coeficiente de absorción acústica de incidencia normal α y la impedancia normalizada z utilizando las ecuaciones (5), (6) y (7) siguiendo el método dado por la norma.

$$r = e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} + H_I}{H_R + H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (5)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 = r_r^2 - r_i^2 \quad (6)$$

$$z = \frac{Z}{Z_0} = \frac{1 + r}{1 - r} \quad (7)$$

Dónde:

- r_r es la componente real.
- r_i es la componente imaginaria.
- x_1 es la distancia entre la muestra y el micrófono más lejano.
- ϕ_r es el ángulo de la fase del factor de reflexión de incidencia normal.
- H_I y H_R son la función de transferencia para la onda incidente y reflejada respectivamente. Z es la impedancia superficial del objeto de prueba.
- Z_0 es la impedancia característica, donde $Z_0 = \rho c_0$

El mismo procedimiento se realizó para cada muestra de los grupos de estudio, asegurando que el ensayo se efectuara bajo condiciones uniformes y con intervalos de tiempo mínimos entre pruebas para evitar variaciones.

2.2.7. Definición del porcentaje óptimo

Para la etapa final se realizó el análisis de datos, recopilando los resultados de los análisis de las etapas anteriores para establecer una relación y una comparación del desempeño de las propiedades

evaluadas respecto a la variable independiente (el porcentaje de reemplazo) con el fin de establecer qué porcentaje de reemplazo representado por los grupos de estudio tiene un mejor desempeño.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Compresión

Para los valores obtenidos de resistencia a compresión se desarrolló la Tabla 2 a manera de resumen de los resultados analizados estadísticamente por medio del software Statgraphics teniendo en cuenta parámetros estadísticos entre los que se resaltan: media de resistencia última que indica el valor promedio del grupo de estudio y el valor de curtosis estandarizada para verificar que los datos obtenidos en cada grupo correspondan a una distribución normal.

Según el análisis proporcionado por Statgraphics valores de curtosis estandarizadas fuera del rango 2 y -2 indican desviaciones fuera de la normalidad, por lo que todos los grupos de estudio cumplen este requerimiento y sus medias pueden considerarse como medidas representativas del conjunto de datos.

Tabla 2. Resumen de parámetros estadísticos

Parámetro	Pt	R10	R15	R20
Recuento	32	32	32	32
Media	26,68	24,93	24,95	22,05
Desviación estándar	4,08	2,96	2,63	2,02
Mínimo	18,84	18,59	17,14	18,67
Máximo	34,52	30,59	29,15	27,08
Sesgo estándar	0,19	0,45	-1,9	0,21
Curtosis estándar	0,76	-0,55	1,27	-0,27

Se realizó una comparación de los grupos de estudio R10^u, R15^u y R20^u con el grupo de control Pt, donde se obtuvo el valor p correspondiente a cada comparación, que indica el nivel de significación mínimo no arbitrario con el que se puede rechazar una hipótesis nula. Para la investigación se fijó un nivel de confianza del 95 %, y la hipótesis nula corresponde a que las medias

comparadas no distan significativamente entre grupos. Para el grupo de estudio R10^u, su valor p corresponde a 0,053, por lo que se definió que sus resultados de compresión media no difieren significativamente con respecto al grupo de control Pt. Sin embargo, los grupos R15^u y R20^u presentaron resultados distintos: el primero obtuvo un valor p de 0,047 (existen diferencias significativas), y debido a los valores de sus medias, se evidencia un decrecimiento del 6,5 % en su desempeño a compresión. Por otro lado, R20^u presentó un valor p de $2,3 \times 10^{-6}$ (existen diferencias significativas), lo que refleja un decrecimiento del 15,66 % en su desempeño a compresión.

3.2. Sorcibilidad

La evaluación de la propiedad de sorcibilidad se resumió en las 4 gráficas de dispersión que conforman las Figuras 5 y 6, donde se visualizan las pendientes correspondientes a la tasa de absorción media de agua en cada una de las dos instancias de estudio, la inicial, o primer contacto con el agua, y la secundaria correspondiente al contacto prolongado.

Después de que se evaluara el estado de regresión lineal y se validara con su respectivo coeficiente de determinación, se establecieron los valores de las pendientes como valores de tasas de absorción.

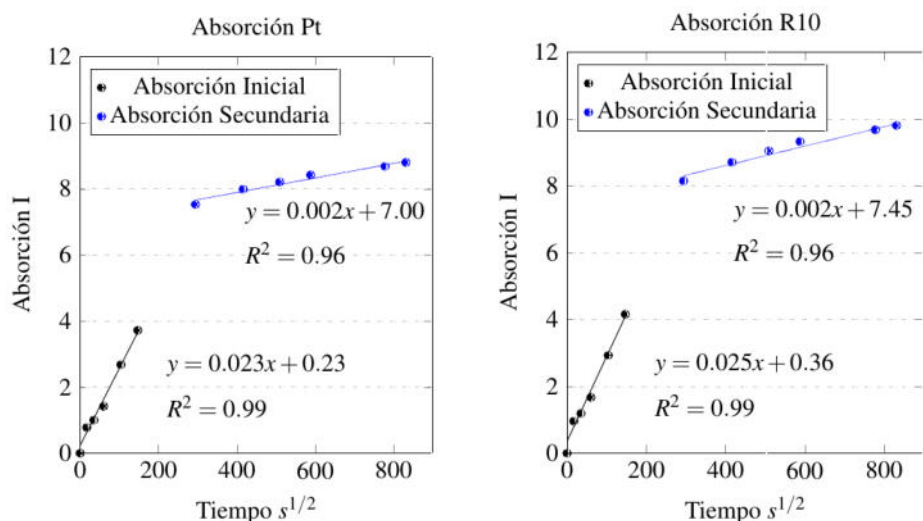


Figura 4. Absorción para Pt y R10

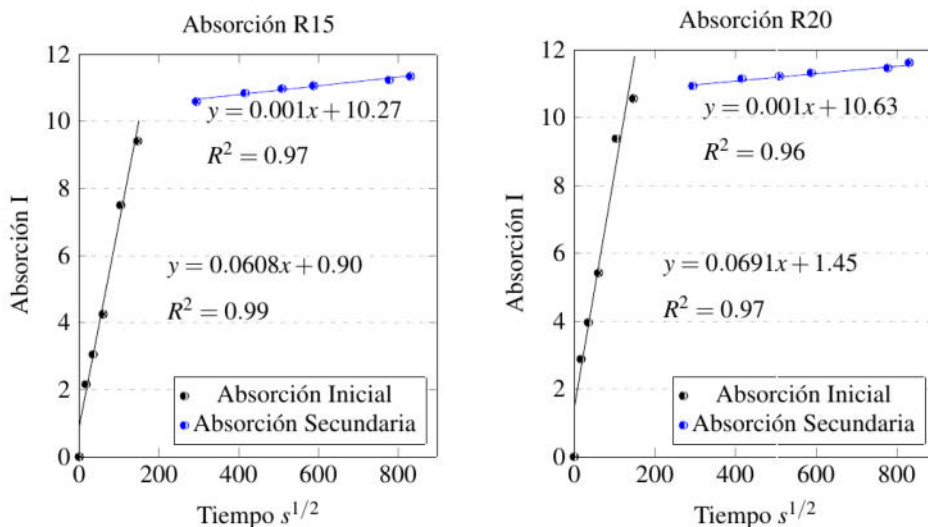


Figura 5. Absorción para R15 y R20

Seguidamente, se pudo afirmar que, con respecto al grupo de control: R10 presenta un aumento del 9 % en su tasa de absorción (TA) inicial y un 32 % en su TA secundaria, por lo que la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz (RHA) aumentó la permeabilidad del mortero en esta dosificación. R15 presentó un aumento de la TA inicial de 160 %, sin embargo, para la TA secundaria se observó un aumento de la impermeabilidad del mortero, con una reducción de dicha tasa en un 40 %. Finalmente, R20 mostró que la TA inicial se acrecentó en un 196 %, mientras que la TA secundaria presentó un decrecimiento del 50 %.

3.3. Desempeño acústico

Con respecto al desempeño acústico, de los ensayos se obtuvieron dos gráficas por grupo de estudio que describen la magnitud de los coeficientes de absorción y reflexión del sonido a través de la variación de la frecuencia a la que fueron expuestos (figuras 7, 8, 9 y 10). Estos coeficientes, cuyos valores están normalizados entre 0 y 1, determinan la interacción del sonido con el material.

Para poder contrastar las propiedades acústicas de las muestras, fue necesaria la realización de un análisis de comportamiento en el que se seleccionaron las frecuencias con valores críticos de comportamiento en ambas propiedades, representadas en un gráfico de dispersión por coeficiente (figura 11). Por consiguiente, el análisis se enfocó en las frecuencias correspondientes a los valores de 220 y 1445 para el coeficiente de reflexión y 495 y 1445 para el de absorción, resumido en las tablas 4 y 5. La elección de estos picos es clave para el estudio, ya que pueden estar asociados con frecuencias críticas que coinciden con la resonancia natural del material, amplificando la onda de sonido [16].

Con base en esto, se pudo observar que para el coeficiente de reflexión en la frecuencia 220 no se encontró apenas variación de los grupos de estudio R10 (1,2 %), R15 (0,6 %) y R20 (2,2 %) con respecto al grupo de control, mientras que para la frecuencia 1445 todos los grupos mostraron un aumento considerable en la propiedad: 338,1 %, 345,6 % y 316,7 % respectivamente. En cuanto al coeficiente de absorción, en la frecuencia 495 se aprecia una disminución del 32,8 % y 31,5 % para los grupos R15 y R20 respectivamente, y un pequeño aumento de 0,89 % para el grupo R10, sin

embargo, para la frecuencia 1445 la disminución fue considerable para todos los grupos siendo en orden: 94,5 %, 97,6 % y 84,8 %.

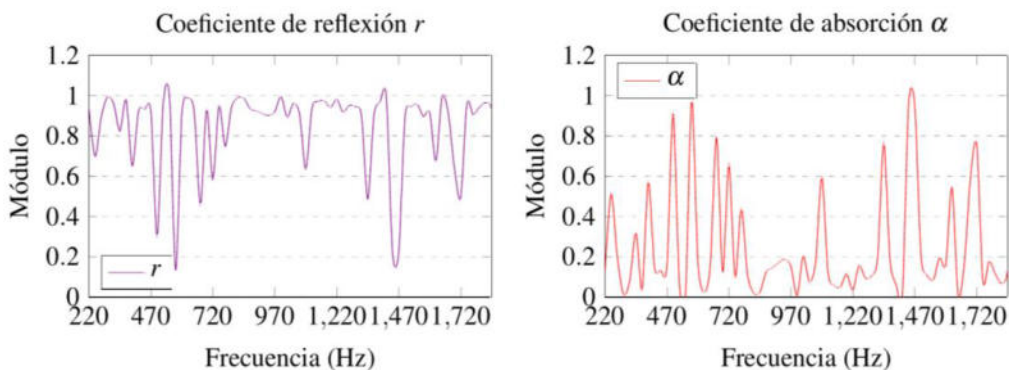
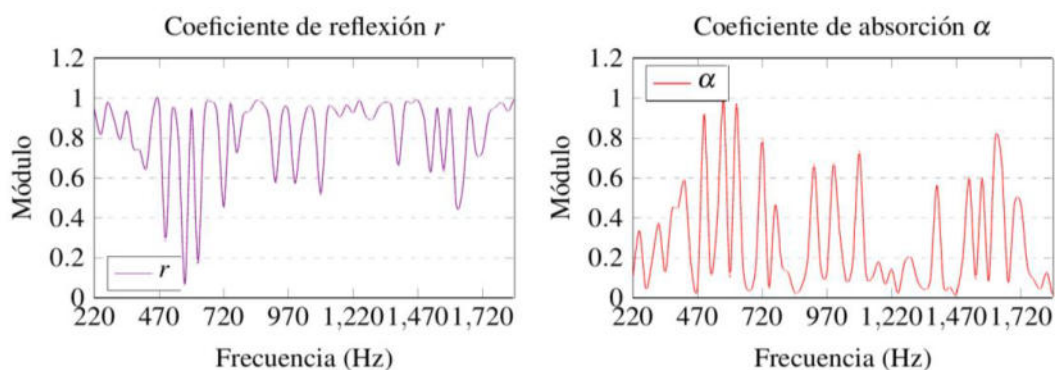
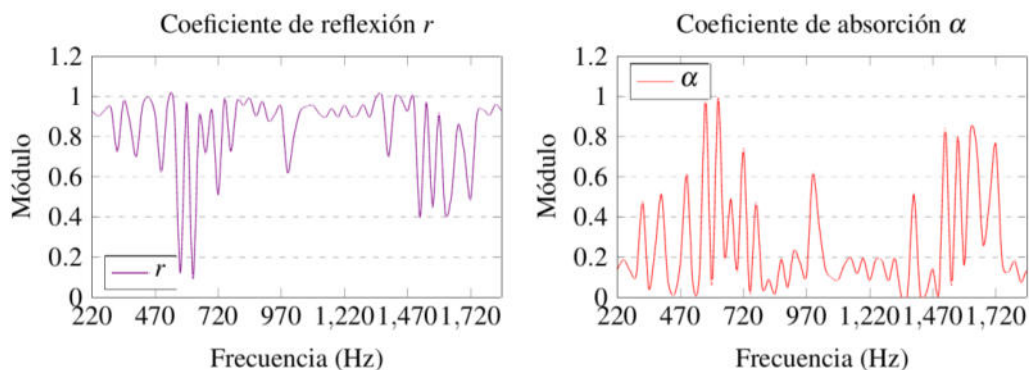
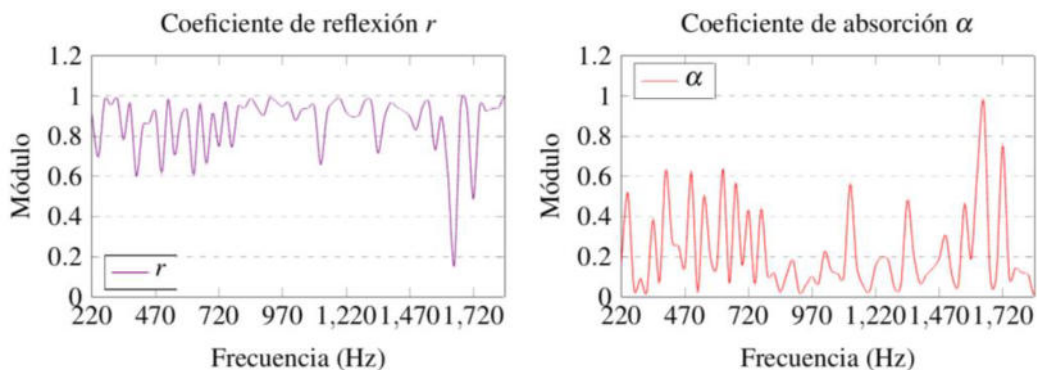
En el análisis de estas propiedades, tanto el coeficiente de reflexión como el de absorción pueden obtener mayor relevancia respecto al otro dependiendo del propósito al que sea enfocado el material. Sin embargo, para lograr un aislamiento óptimo, es esencial considerar ambos factores, pues mientras uno evita la entrada de sonido al reflejarlo, el otro minimiza su retransmisión por vibraciones al absorber la energía sonora que logra filtrarse. Este principio se aplica, por ejemplo, en el diseño de estructuras como las barreras acústicas [17]. Teniendo en cuenta lo recopilado, se pudo definir que el mortero adicionado con RHA funciona como un mejor aislante acústico que el mortero convencional.

3.4. Porcentaje óptimo

Debido a que el comportamiento de los grupos con respecto a sus propiedades acústicas se asemejó en sus resultados favorables, y dado que no se presentó una variación significativa de su resistencia a la compresión con respecto al grupo de control, el porcentaje de reemplazo del 10 % fue seleccionado como el porcentaje óptimo de la investigación.

4. CONCLUSIONES

El reemplazo parcial de cemento por ceniza de cascarilla de arroz (RHA) afecta en diferentes proporciones cada una de las propiedades evaluadas. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, el 10 % de reemplazo mostró un desarrollo total de la resistencia a temprana edad (14 días), mientras que los porcentajes de 15 % y 20 % alcanzaron únicamente un 86 % de desarrollo. A los 28 días, los reemplazos de 15 % y 20 % disminuyeron la resistencia última, siendo más significativo en el porcentaje mayor al no poder clasificarse como mortero tipo H. Esto repercute en la dificultad de su uso en estructuras sometidas a altas cargas, limitándose a usos más generales como muros portantes, pavimentos y tabiques, teniendo en cuenta lo especificado en la tabla X.1.1 de la norma NTC 3329 [18]. El 10 % representó el mejor resultado entre los grupos de estudio alcanzando una resistencia de 24,93 MPa, comparable con el desempeño de la mezcla patrón (26,68 MPa), grupo diseñado como mortero de alta resistencia.

**Figura 6.** Coeficientes r y α Pt**Figura 7.** Coeficientes r y α R10**Figura 8.** Coeficientes r y α R15**Figura 9.** Coeficientes r y α R20

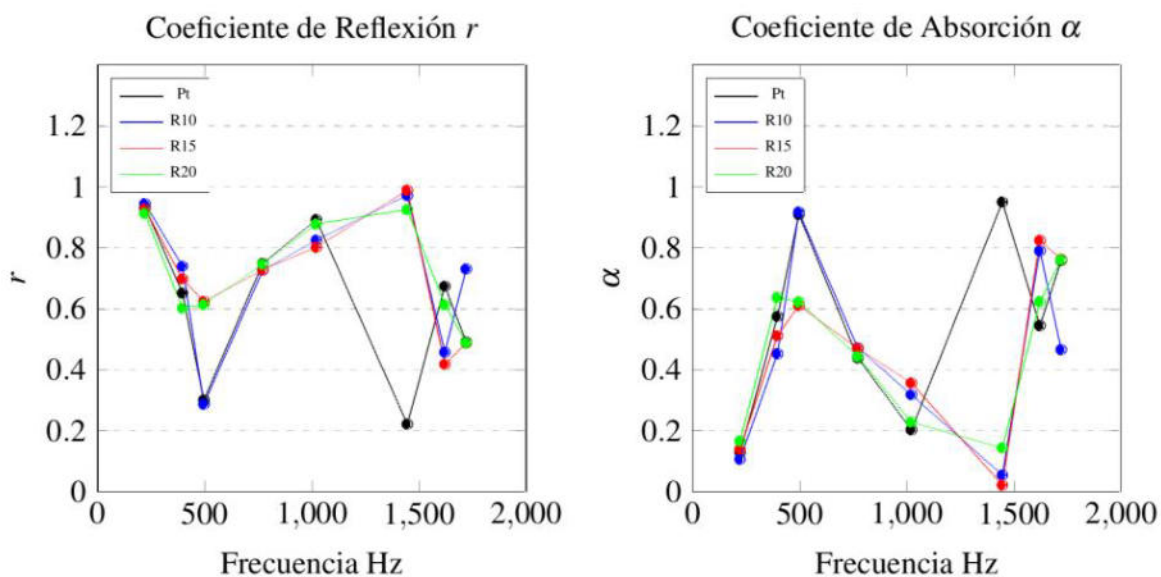


Figura 10. Diagramas de picos r y α

Con relación a la sorcibilidad y en confrontación con el grupo patrón, los reemplazos del 15 % y 20 % presentaron un incremento significativo de la tasa de absorción inicial, indicando una alta permeabilidad en un primer contacto con el agua y por tanto una menor durabilidad a los ataques en superficie [19]. Sin embargo, en exposiciones prolongadas, redujeron la tasa de absorción secundaria, haciéndolos más efectivos contra el deterioro masivo interno debido a un contacto continuo. El 10 % de reemplazo presentó tasas de absorción similares a las del grupo de control, lo que lo hace el más adecuado para aplicaciones donde se requiere un balance entre la resistencia inicial al agua y la durabilidad a largo plazo.

Finalmente, a 220 Hz, los morteros con 15 % y 20 % de reemplazo de RHA redujeron su capacidad de reflexión a 0,927 y 0,912, respectivamente, mientras que el de 10 % la aumentó en 1,2 %, alcanzando 0,945 en comparación con el mortero patrón (0,933). A 1445 Hz, todos los reemplazos mostraron un aumento significativo respecto a la mezcla patrón (0,221), con valores de 0,972, 0,988 y 0,925. En cuanto al coeficiente de absorción, a 495 Hz, los reemplazos del 15 % y 20 % redujeron sus valores a 0,610 y 0,623 frente al grupo control (0,909), mientras que el 10 % presentó un leve incremento del 0,89 %, alcanzando 0,917. A 1445 Hz, todos los morteros con RHA mostraron una disminución, con valores de 0,054, 0,022 y 0,144, en contraste con la mezcla patrón (0,950). Considerando que un material óptimo acústicamente debe equilibrar la reflexión y absorción del sonido, los resultados sugieren que el reemplazo del 10 % de RHA es la mejor opción para un confort acústico efectivo, ideal para su aplicación en muros divisorios o como parte de sistemas de aislamiento acústico en fachadas y cerramientos.

Debido a los análisis presentados, se define que el porcentaje óptimo de sustitución parcial de cemento por RHA es del 10 %, representado por el grupo de estudio R10.

5. AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, agradecer a la Universidad Cooperativa de Colombia, campus Neiva, la cual prestó las instalaciones de los laboratorios e implementos para poder realizar el proyecto. A la empresa huilense Instituto de Investigación, Innovación y Desarrollo para La Ciencia IDELAC

por disponer el equipo usado para el desarrollo de los ensayos de impedancia acústica.

REFERENCIAS

- [1] EPA (Environmental Protection Agency), “U.S. Cement Industry Carbon Intensities (2019)” 2021.
<https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-10/cement-carbon-intensities-fact-sheet.pdf>.
- [2] Poudyal L, Adhikari K. Resources, environment and Sustainability. 2021; 4 (17): 100024. doi:10.1016/j.RESENV.2021.100024.
- [3] McDonald L, Glasser FP, Imbabi MS. *Materials*. 2019; 12(4): 554. doi:10.3390/MA12040554.
- [4] Hareru WK, Asfaw FB, Ghebrab T. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2022; 13 (1): 167–184 doi:10.30880/ijscet.2022.13.01.016.
- [5] Fuentes Molina N, Iván O, Tarifa F, Mendoza LV. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2015; 25 (2): 99–116 doi:10.18359/rcin.13443.
- [6] ARGOS, “CEMENTO GRIS DE USO GENERAL FICHA TÉCNICA / VERSIÓN 1”. [En línea]. Disponible en: www.argos.com.co
- [7] Cataño Misas J, Guzmán López K, Perpiñan Peña M. Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática. Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil, Medellín y Envigado. Universidad Cooperativa de Colombia. 2021
<https://hdl.handle.net/20.500.12494/32902>
- [8] Puerta C, Jaramillo L, Upegui S. *Prácticas y herramientas de sostenibilidad: Valorización de la cascarilla de arroz en diferentes sectores*. Tecnológico de Antioquia. Colombia, 2021.
- [9] Norma NTC 220: Determinación de la resistencia en morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 2022.
- [10] Kang SH, Hong SG, Moon J. *Cem Concr Res*. 2019; 115: 389–400. Doi:10.1016/j.CEMCONRES.2018.09.004.
- [11] Norma NTC 112: Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2021.
- [12] Norma NTC 111, Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidráulico,

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2024.
- [13] Norma ASTM C1580, Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil, USA: American Society for Testing and Materials, ASTM, 2020.
- [14] Norma ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, USA: American Society for Testing and Materials, ASTM, 2022.
- [15] Norma ISO 10534-2, Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia, Organización Internacional de Normalización [ISO], 1998.
- [16] Peralta JA, Reyes López P, Godínez Muñoz A. Latin-American Journal of Physics Education. 2009; 3 (3): 18.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3694414&info=resumen&idioma=SPA>.
Accedido: 10-feb-2025].
- [17] Puma Arias JY. Atenuación sonora por barreras acústicas a base de residuos orgánicos para reducir el nivel de ruido en una avenida principal. Universidad César Vallejo, Lima, Perú. 2018.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/19344>.
- [18] Norma NTC 3329, Concretos. Especificaciones del mortero para unidades de mampostería. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2004.
- [19] Arango Londoño JF, Patología de la Construcción: Lesiones generales, tomo I, vol. 1. Medellín: Empresa Colombiana de Cementos S.A.S. ALIÓN, 2023

6. MINIBIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

WILLIAM JAVIER ANDRADE MARTÍNEZ Estudió Ingeniería Civil en la Universidad Piloto de Colombia, es especialista en Patología de la Construcción y terminó la Maestría en Construcción en la Universidad Nacional de Colombia. Es profesor tiempo completo de la Universidad Cooperativa de Colombia y miembro activo del comité No. 100 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). También, es el director ejecutivo del Instituto de Investigación, Innovación y Desarrollo para la Ciencia (IDELAC). (ORCID: 0009-0008-2126-8985)

MARÍA VALENTINA AYA BUSTOS recibió su título de ingeniería civil en la Universidad Surcolombiana (USCO, Colombia), hace parte del semillero de investigación de ingeniería civil de la Universidad Cooperativa de Colombia (UCC), una de las líderes del desarrollo del prototipo del tubo de impedancia acústica para la medición de propiedades de reflexión y absorción de ondas de sonido en materiales del Instituto de Investigación, Innovación y Desarrollo para la Ciencia (IDELAC). (ORCID: 0009-0005-9210-5217)

JUAN MANUEL CASTRO ZAMBRANO recibió su título de ingeniería civil en la Universidad Surcolombiana (USCO, Colombia), hace parte del semillero de investigación de ingeniería civil de la Universidad Cooperativa de Colombia (UCC), uno de los líderes del desarrollo del prototipo del tubo de impedancia acústica para la medición de propiedades de reflexión y absorción de ondas de sonido en materiales del Instituto de Investigación, Innovación y Desarrollo para la Ciencia (IDELAC). (ORCID: 0009-0006-3159-1028)