

Acoustic Mortar for Urban Infrastructures Based on Recycled Rubber and Rice Hulls

Eliana Contreras Jordán¹, Jazmin Mazzini Moran¹ ; Bryan Godoy Romoleroux¹; Leonel Olmedo Carrillo¹.

¹Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, Ecuador, econtrerasj@ulvr.edu.ec, jmazzininim@ulvr.edu.ec,
bgodoyr@ulvr.edu.ec, lolmedoc@ulvr.edu.ec

Abstract. – *This analysis examines a modified mortar's mechanical and acoustic characteristics, utilizing recycled rubber and rice husk as components, to improve sound insulation and promote sustainability in urban construction. The study was conducted using an experimental method, in which various dosages of modified mortar were created and compared with a conventional mortar (MT1). The findings showed that the mortar with the most appropriate dosage (MR4) achieved a compressive strength of 19.32 MPa after 28 days, similar to the performance of ordinary mortar. Regarding sound insulation, the modified mortar reduced the noise level by 7.88% (from 82.019 dB without coverage to 75.553 dB with modified mortar), demonstrating its effectiveness in sound absorption. The use of statistical techniques, such as ANOVA and Kruskal-Wallis, corroborated significant variations in sound performance between samples, highlighting the effectiveness of the recycled mortar. Finally, the inclusion of recycled rubber and rice husks not only enhances the mortar's sound characteristics but also provides a sustainable solution by reducing solid waste and CO2 emissions. This modified mortar was presented as a viable, eco-friendly option for urban construction, in line with contemporary trends toward a circular economy and more environmentally friendly construction.*

Keywords-- *Acoustic insulation, construction materials, noise pollution, coating mortar, environment.*

Mortero acústico para infraestructuras urbanas a base de caucho reciclado y cascarilla de arroz

Eliana Contreras Jordán¹, Jazmin Mazzini Moran¹; Bryan Godoy Romoleroux¹; Leonel Olmedo Carrillo¹.

¹Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, Ecuador, econtrerasj@ulvr.edu.ec, jmazzinim@ulvr.edu.ec, bgodoyr@ulvr.edu.ec, lolmedoc@ulvr.edu.ec

Resumen– Este análisis examinó las características mecánicas y sonoras de un mortero modificado, mediante la inclusión de caucho reciclado y cascarilla de arroz como componentes, con la finalidad de mejorar el aislamiento sonoro y fomentar la sostenibilidad en el ámbito de la edificación urbana. El estudio se llevó a cabo a través de un método experimental, en el que se crearon diversas dosificaciones de mortero modificado y se cotejó con un mortero convencional (MT1). Los hallazgos mostraron que el mortero con la dosificación más adecuada (MR4) logró una resistencia a la compresión de 19.32 MPa tras 28 días, algo parecido al desempeño del mortero común. En lo que respecta al aislamiento sonoro, el mortero modificado consiguió disminuir el nivel de ruido en un 7.88% (desde 82.019 dB sin cobertura hasta 75.553 dB con mortero modificado), evidenciando su efectividad en la absorción del sonido. El uso de técnicas estadísticas, como ANOVA y Kruskal-Wallis, corroboró variaciones importantes en el rendimiento sonoro entre las muestras, resaltando la eficacia del mortero reciclado. Para finalizar, la inclusión de caucho reciclado y cascarilla de arroz no solo potencia las características sonoras del mortero, sino que también proporciona una solución sustentable al disminuir los desechos sólidos y las emisiones de CO₂. Este mortero modificado se presentó como una opción ecológica, viable para la edificación urbana, en consonancia con las tendencias contemporáneas hacia una economía circular y construcciones más amigables con el entorno natural.

Palabras clave-- Aislamiento acústico, materiales de construcción, contaminación acústica, mortero revestimiento, medio ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha considerado que el impacto ambiental más significativo se produce en el sector de la construcción, de acuerdo al informe del estado global 2020 sobre los Edificios y la Construcción [1], indica que el 37% a escala mundial es del proceso de construcción industrializado, factores que provocan la disminución de bienes naturales y la generación de desechos. Particularmente, la industria cementera contribuye con cerca del 5% de las emisiones de dióxido de carbono, uno de los gases responsable del calentamiento global y el cambio climático. El concreto constituye el principal material de construcción a nivel global, con una demanda anual de 1,6 billones de toneladas de cemento. Sin embargo, su producción tiene un impacto ambiental significativo, ya que por cada kilogramo de cemento fabricado se libera aproximadamente un kilogramo de CO₂ a la atmósfera. Además, el uso constante de maquinaria pesada durante los procesos de construcción contribuye considerablemente a las emisiones de dióxido de carbono. A esto se suma el transporte de los materiales hasta el sitio de

obra, que representa entre el 6% y las emisiones de gases de efecto invernadero suman un 8% del total. generados en una construcción [2], lo que subraya la necesidad de implementar estrategias sostenibles, como el uso de materiales locales y técnicas de construcción más eficientes, para reducir el impacto ambiental.

Desde el enfoque del confort, el ruido creado por el tráfico vehicular, superan los 90 dB en zonas críticas, ha sido objeto de estudio. Este fenómeno ha impulsado la implementación de estrategias para la mitigación, siendo las más aplicadas los muros insonorizantes en áreas sensibles, tales como parque. [3] [4] [5].

Según los datos, cada neumático reciclado contribuye a la reducción de aproximadamente 32,8 kg de CO₂ y al ahorro de 10,5 litros de petróleo, lo que representa un beneficio significativo en términos de sostenibilidad y reducción. La producción de neumáticos recauchutados presenta una reducción media del 51,7% en emisiones en comparación con neumáticos nuevos. La utilización de materiales reciclados no solo disminuye la dependencia de recursos naturales, sino que también reduce el impacto ambiental generado por la fabricación de neumáticos nuevos. Este enfoque es especialmente importante, ya que un neumático puede tardar hasta 1,000 años en descomponerse si se abandona. El uso de caucho reciclado ayuda a disminuir la cantidad de neumáticos desechados, que representan un problema ambiental significativo. Cada año, se generan aproximadamente 1,500 millones de neumáticos fuera de uso, y su reciclaje contribuye a mitigar este impacto [6]

Los neumáticos descartados pueden ser reutilizados en diversas aplicaciones dentro de la industria de la construcción, como, por ejemplo, en la producción de mortero, el estudio del empleo de caucho reciclado en morteros. ha demostrado que la incorporación de caucho pulverizado puede mejorar ciertas propiedades del mortero, como la resistencia a impactos y el aislamiento térmico, además de contribuir a la sostenibilidad al utilizar materiales reciclados [7]. Esto representa una alternativa interesante para abordar tanto las necesidades constructivas como los desafíos ambientales.

Según el Instituto Ecuatoriano de Censo (INEC), para el 2023 ha presentado un promedio de 41,742 construcciones de edificaciones, con un área total a construir de 8,216,103 metros cuadrados promedio, siendo el mortero el material de

construcción esencial para unir ladrillos, bloques de hormigón y piedras, formando muros y estructuras, también es utilizado para el enlucido y revoque en capas delgadas sobre superficies.[8]

Por otro lado, se encuentra la problemática con la cascarilla de arroz, ya que este material se lo arruma en grandes cantidades formando un tipo de relleno que no es estable para la construcción en las zonas rurales. También produce contaminación al momento de la quema, debido a la cantidad de humo que emana y afecta a las zonas pobladas que se encuentran alrededor. Para reducir las emisiones de CO₂ en la construcción hasta un 30% en comparación con morteros convencionales que utilizan agregados vírgenes, debido a varios factores: La cascarilla de arroz puede ser utilizada como un material puzolánico, lo que significa que puede reemplazar parcialmente el cemento o al agregado en las mezclas. Al sustituir parte del cemento por cascarilla, se disminuye la cantidad total de cemento necesario, lo que a su vez reduce las emisiones asociadas con su producción. [9]

Según [10], la composición química es del 18,53% de ceniza, 2,72% de extractivos, 26,1% de lignina, 4,16% de hemicelulosa y 45,84% de celulosa. En las características físicas se halló 7,91% de humedad, densidad de partícula de 400,69 Kg/m³, una densidad aparente de 115,39 Kg/m³ y un tamaño de partícula de entre 1,7 y 2,36 mm.

En contenido debido a su constitución orgánica que interactúa químicamente con otros componentes y causa una alteración negativa en las propiedades de fraguado y endurecimiento características del aglomerante. Se estudiaron técnicas para reducir la materia orgánica, identificando tres estrategias: Aplicar un acelerador de fraguado, un lavado extendido con agua para eliminar el polvo y el material desprendido (técnica empleada en este estudio) y mineralizar la cáscara.

Sin embargo, a pesar de que el caucho tenga elasticidad, repelente al agua, resistencias a bajas temperaturas entre otras, la cascarilla de arroz también tiene propiedades como ser aislante térmico, resistente al fuego y durabilidad. [11][12]

El caucho reciclado, derivado en su mayoría de neumáticos fuera de uso (NFU), ha mostrado ser un material altamente efectivo para la absorción de sonido. Su estructura celular y su elasticidad natural permiten que el caucho atenúe tanto el ruido aéreo como el de impacto, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones en suelos y paredes [13]

La materia prima utilizada en la construcción ofrece diversas propiedades y tipologías en sus entornos de aplicación, procedentes de diversas fuentes. Una clasificación importante se basa en las materias primas utilizadas en su producción. Entre estos materiales se encuentra el cemento, que se utiliza desde hace mucho tiempo y actualmente se

emplea en todo el mundo. Su composición demanda material cementante junto con otros componentes como agua y árido fino (arena), y ocasionalmente pueden incorporarse aditivos para mejorar, reducir o alcanzar propiedades específicas.

El proceso de formación se rige por la normativa vigente que debe seguirse para cumplir los requisitos establecidos en función del uso al que se destina, como unir elementos constructivos, levantar muros, rellenar espacios entre bloques, trabajos de revestimiento de superficies, construcción de carreteras, etc. En términos generales, los morteros se agrupan según su función en morteros de adherencia, morteros de relleno y morteros de acabado, cada uno diseñado para cumplir con requisitos específicos en la construcción y asegurar la duración. [14]

Según [15] en su investigación, analiza el rendimiento acústico de paneles de hormigón con caucho granulado en términos de absorción y aislamiento de sonido en distintas frecuencias. Se llevaron a cabo ensayos utilizando distintos porcentajes de sustitución de agregado fino por caucho (7,5% y 15%) y se evaluaron propiedades como trabajabilidad, resistencia a la compresión y densidad, además de los efectos de ciclos de congelación y calentamiento. Los resultados indicaron que el hormigón con mayor contenido de caucho (15%) presentó mejor absorción acústica, especialmente en frecuencias altas.

El uso de caucho reciclado en construcción es una estrategia utilizada para promover la sostenibilidad y minimizar el impacto ambiental en la construcción, se adoptaron prácticas y materiales que favorecen la eficiencia energética, reducen los residuos y disminuyen la huella de carbono. Derivado de neumáticos fuera de uso, este material aporta beneficios como la reducción de residuos, la mejora de propiedades mecánicas y la eficiencia energética. Actúa como aislante térmico y acústico, absorbe vibraciones y reduce costos al reemplazar materias primas. Es comúnmente aplicado en pavimentos, asfalto modificado, bloques de mampostería y sistemas aislantes. Este material, derivado principalmente de neumáticos fuera de uso (NFU), presenta múltiples aplicaciones y beneficios en el sector de la construcción.[16][17][18]

La cascarilla de arroz surge como material sustentable en la construcción, utilizando el residuo agroindustrial en diferentes investigaciones se ha estudiado los beneficios y su aporte en los materiales de mampostería en la resistencia mecánica del concreto, atribuible a su contenido de sílice amorfa que actúa como puzolana. También contribuye al aislamiento térmico y acústico, y reduce los costos de construcción, siendo especialmente útil en proyectos de vivienda social. Su aplicación incluye la fabricación de bloques de suelo-cemento, fibrocemento y hormigón modificado [19][20][21][22].

En el contexto de la constante evolución hacia urbes y comunidades sustentables, se investigó un mortero elaborado con caucho reciclado y cascarilla de arroz como agregados, diseñado específicamente para funcionar como aislante acústico en infraestructuras urbanas. Se desarrollaron morteros con distintas composiciones porcentuales para su aplicación en mamposterías, evaluando sus propiedades físicas y mecánicas. Esta propuesta surge como una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, asociadas a la combustión de residuos derivados.

Este enfoque se alineó con las tendencias globales hacia la construcción ecológica y la economía circular, ofreciendo una solución para mitigar la contaminación acústica al mismo tiempo que se abordaba la problemática de los residuos. Trabajos previos han explorado la viabilidad de otros residuos agroindustriales, como el bagazo de caña, en la fabricación de elementos constructivos como ladrillos para mampostería, demostrando resultados positivos en términos de resistencia mecánica y sostenibilidad [24].

II. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo con una metodología cuantitativa con un enfoque descriptivo y comparativo. Los procedimientos empleados incluyeron técnicas experimentales, exploratorias, documentales, deductivas, empíricas y observacionales para la creación del prototipo de mortero. El objetivo principal es demostrar científicamente la viabilidad del mortero, analizando su comportamiento mediante pruebas mecánicas y acústicas. El estudio se realizó con un diseño experimental incluyendo ensayos de laboratorio con controles y variaciones controladas de las proporciones de materiales reciclados en el mortero. Se midieron propiedades específicas, como resistencia a la compresión, densidad y capacidad de reducción acústica, para obtener resultados objetivos y replicables que permitan determinar la viabilidad de este mortero en aplicaciones urbanas.

A. Materiales.

Para el estudio se elaboraron cinco muestras diferentes, con cada formulación específica. Cuatro de estas muestras incorporarán los agregados innovadores (caucho reciclado y cascarilla de arroz), mientras que una muestra será de mortero tradicional para servir como referencia. Los materiales se muestran en la Fig. 1 y Fig. 2

Cemento Hidráulico.

Es un producto de la quema de arcillas y calizas, siendo estos extraído de lugares como canteras y luego pasan por un proceso de trituración. En el mercado todo tipo de cemento debe cumplir con las normas NTE INEN 2380 y ASTM C1157

Agregados finos.

Están compuestos por partículas cuyo tamaño pasa por un tamiz de 4.75 mm (N.º 4), y suelen ser arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas.

Agregados gruesos.

Están formados por la cascarilla de arroz y el caucho reciclado.

Agua

No tiene que contener sustancias químicas, libre de aceites y materiales orgánicos. Se utilizó agua de la red pública de abastecimiento.



Fig. 1 Materiales reciclados para la utilización del mortero modificado.

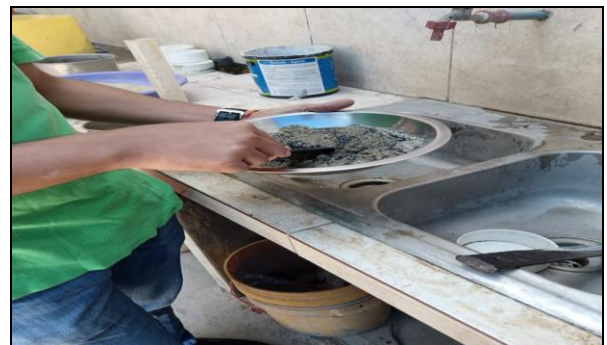


Fig. 2 Mezcla con los materiales reciclados.

B. Métodos

Tratamiento de la cascarilla de arroz.

Dosificaciones.

Se elaboraron dos tipos de morteros, el mortero tradicional (MT1) y el mortero reciclado agregando caucho reciclado y cascarilla de arroz (MR2, MR3, MR4).

Para el MT1 se utilizó la dosificación 1:2, esto es, una parte de cemento y dos partes de arena. Para los prototipos modificados, la proporción corresponde a (cemento: arena: caucho reciclado: cascarilla de arroz); así se obtiene el MR2 la dosificación corresponde a 1:0,75:0,75:0,5, para el MR3 1:0,5:1:0,5 y para el MR4 corresponde a 1:0,25:1,25:0,5. Para todas las dosificaciones se utilizó un mismo peso de agua, 472,7 gramos. En la tabla I se muestran las dosificaciones utilizadas:

TABLA I
 COMPOSICIÓN DE LAS DIFERENTES FORMULACIONES DE MORTERO

Muestra	Materiales			
	Cemento	Arena	Caucho reciclado	Cascarilla de arroz
MT1	1	2	0	0
MR2	1	0,75	0,75	0,5
MR3	1	0,5	1	0,5
MR4	1	0,25	1,25	0,5

Moldeado del mortero.

Se realizaron ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión de morteros con cemento hidráulico de acuerdo con la Norma NTE-INEN 488, usando cubos de 50 mm de arista. Para la preparación de los moldes utilizados no deben tener más de tres compartimientos cúbicos como se muestra en la Fig. 3. Antes de colocar la mezcla se aplica una capa de aceite que actúa como un agente desencofrante para evitar adherencias. Luego para el llenado de los moldes en capas, se aplicó un total de 32 golpes con el apisonador por capa. Se procede al almacenamiento de las muestras, desencofrado después de las 72 horas tras el fraguado. Para determinación de la resistencia a la compresión, las muestras se ensayan inmediatamente después de retirarlas del gabinete húmedo, para este estudio fue después de 1 hora como lo indica la norma.



Fig. 3 Colocación del mortero en los moldes.

Ensayos de Resistencia

Para el ensayo de resistencia a la compresión, se utilizaron 12 cubos fueron organizados en grupos de tres para romperlos a los 7, 14 y 28 días. En la Fig. 4 y fig. 5 se muestra el procedimiento de la prueba con el equipo utilizado.



Fig. 4 Preparación de la muestra para prueba de resistencia.



Fig. 5 Prueba de resistencia.

Ensayos acústicos.

Para el estudio se desarrollaron paneles de mortero modificado. Los paneles se realizaron de tal forma que caben en la caja reverberante con dimensiones de 0,80 x 0,80 x 0,40 m fabricadas en Plywood cada caja; los paneles tienen un espesor medio de 5 mm. Estas cajas representaban el muro de una casa que será revestida con el mortero modificado.

En el diseño de las cajas se ha considerado las especificaciones de la Norma UNE-EN ISO 354:2004, que establece los métodos para la medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. En la Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8, se muestra en una escala 1:12,6 .



Fig. 6 Caja reverberante utilizada para la prueba acústica.



Fig. 7 Caja reverberante con la capa de mortero modificado.



Fig. 8 Caja reverberante sin capa de mortero modificado

La superficie de prueba para materiales absorbentes planos se encuentra dentro de un rango de 10 a 12 m² en una cámara de 200 m³. En espacios con mayor volumen, el límite superior estará determinado por la fórmula $V/200 \text{ m}^3)^{2/3}$. Además, las dimensiones de la muestra deben cumplir con una proporción de ancho a largo.

Para llevar a cabo los ensayos acústicos, se operaron con los sonómetros de la marca Center 390, capaz de almacenar hasta 31.000 datos de lectura. El equipo dispone de un intervalo de medición de 30 a 130 dB, filtros de ponderación frecuencial A y C, y una precisión de $\pm 1,4 \text{ dB}$ [19]. Las mediciones se efectuaron cada 5 segundos durante un lapso de 10 minutos, lo que resultó en la obtención de 120 registros, los cuales fueron posteriormente descargados y analizados. Posteriormente, estos datos fueron transferidos a una computadora para su interpretación. Como fuente sonora, se utilizó un altavoz que reproducía grabaciones de ruido de tráfico urbano durante horas pico, con el fin de simular condiciones reales y evaluar el impacto acústico en el entorno estudiado.

Con base en los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre el mortero con caucho reciclado y el mortero tradicional, analizando sus características.

III. RESULTADOS

A Ensayo de resistencia a la compresión.

En la Tabla II se presentan los valores correspondientes a la resistencia en los diferentes días, el mortero tradicional (MT1) a los 28 días registró una resistencia de 19,54 MPa, el mortero modificado MR2 registró una resistencia de 10,96 MPa, el mortero MR3 registró una resistencia de 16,63 MPa y el mortero MR4 de 19,32 MPa. De acuerdo a la norma NTE

INEN 2518 la resistencia mínima establecida para estos tipos de morteros no debe ser inferior a 17,2 MPa para tipo M, 12,4 MPa para tipo S, 5,2 MPa para tipo N y 2,4 MPa para tipo O.

TABLA II
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)

Muestra	Días	MPa
MT1	3	8,97
MT1	21	19,17
MT1	28	19,54
MR2	3	2,73
MR2	21	10,71
MR2	28	10,96
MR3	3	5,09
MR3	21	16,12
MR3	28	16,63
MR4	3	8,01
MR4	21	18,95
MR4	28	19,32

En la Figura 9 se observa la evolución de la resistencia a la compresión de las distintas formulaciones de mortero (MR2, MR3, MR4 y MT1) a lo largo de los días 3, 21 y 28. Se evidencia un incremento progresivo en la resistencia en todas las muestras conforme avanza el tiempo de curado, siendo el mortero MR4 el que presenta valores más cercanos al mortero tradicional (MT1) a los 28 días. Para determinar si estas diferencias eran estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Previamente, se evaluó el supuesto de normalidad a través de una prueba de Kolmogórov-Smirnov, cuyos resultados se muestran en la Gráfica 10. Esta arrojó un valor $p > 0,150$, lo cual indica que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad, validando el uso del ANOVA. Por tanto, los resultados obtenidos sobre resistencia a la compresión pueden interpretarse con base en métodos paramétricos confiables.

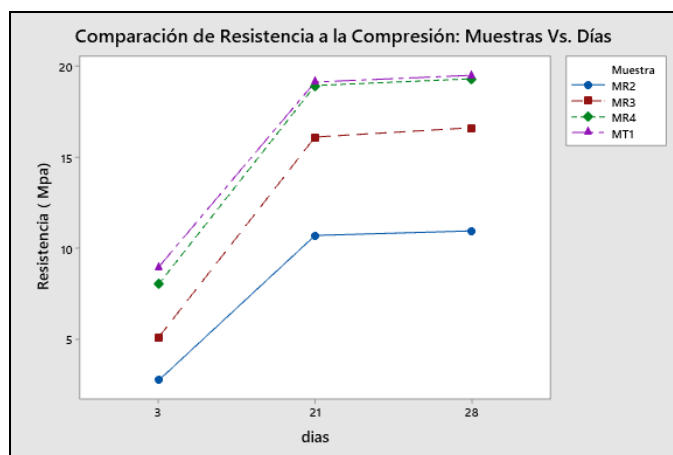


Fig. 9 Resistencia a la compresión entre dosificaciones.

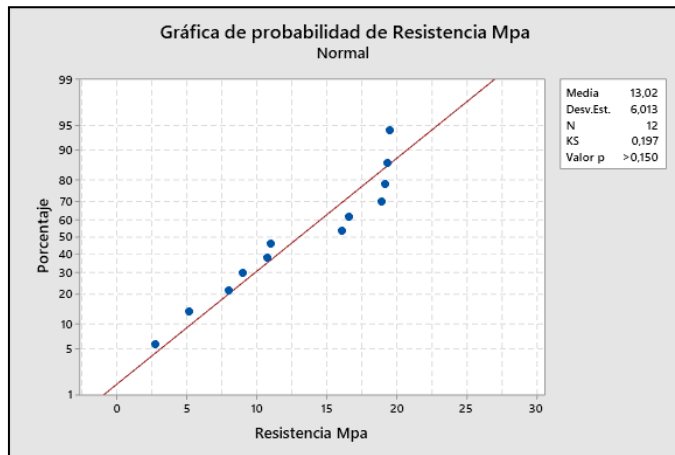


Fig. 10 Resistencia a la compresión entre dosificaciones.

Para evaluar si existen diferencias significativas en los tres morteros modificados (MR2, MR3 y MR4) en comparación con un mortero tradicional (control-MT1), Se ha utilizado el método estadístico del ANOVA de un solo factor con las variables Días y Tipo de mortero.

En la tabla III, se observa los resultados obtenidos del ANOVA un solo factor con la variable Días, dado que el Valor p es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula, por lo que quiere decir que hay evidencia estadística que existen diferencias significativas en la resistencia en los diferentes días de medición, mientras que el Valor F indica alta variabilidad entre los días de medición en comparación con la variabilidad dentro de cada grupo de días.

Las mediciones de resistencia en función de los días (3, 21 y 28 días) muestran una variación significativa, lo cual propone que el tiempo de curado afecta de manera significativa la resistencia del mortero.

TABLA III
ANOVA DE UN SOLO FACTOR: RESISTENCIA VS. DÍAS

Hipótesis		Información del factor			
Hipótesis nula:		Factor Días	Niveles 3	Valores 3; 21; 28	
Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna					
No todas las medias son iguales					
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$					
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor p
Días	2	279,1	139,54	10,59	0,004
Error	9	118,6	13,18		
Total	11	397.7			

Los resultados de la aplicación de la prueba post hoc de Tukey que permite hacer comparaciones múltiples entre todos los días y controla bien el error tipo I (probabilidad de

encontrar diferencias significativas por azar) en múltiples comparaciones, se muestran en la tabla IV cuyos resultados determina que los días específicos que hay diferencias significativas son los 3-21 y 3-28.

TABLA IV
PRUEBAS SIMULTANEAS DE TUKEY PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%					
Días	N	Media	Agrupación		
28	4	16.61	A		
21	4	16.24	A		
3	4	6.20	B		
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.					
Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias					
Días	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor de la prueba	Valor p ajustado
21 - 3	10,04	2,57	(2,87; 17,21)	3,91	0,009
28 - 3	10,41	2,57	(3,24; 17,58)	4,06	0,007
28 - 21	0.37	2,57	(-6,79; 7,54)	0,15	0,988
Nivel de confianza individual = 97,91%					

Como se evidencia en la Figura 11, que el tiempo de curado influye significativamente en la resistencia a la compresión del mortero. Entre los días 3 y 21 se presenta el mayor incremento en la resistencia, mientras que entre los días 21 y 28 se observa una estabilización. Los intervalos de confianza al 95% confirman esta diferencia, al no superponerse entre los primeros dos puntos de medición. La gráfica de efectos principales refuerza esta tendencia, demostrando que la mayor ganancia estructural ocurre durante las primeras tres semanas de curado, lo que valida su importancia como parámetro técnico clave en el desempeño del mortero

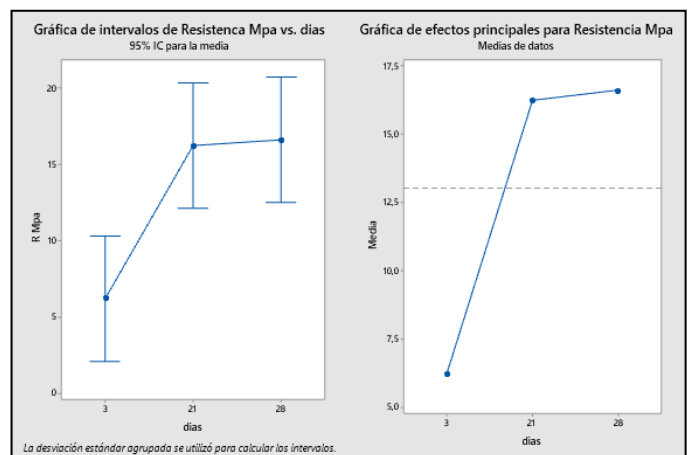


Fig. 11 Gráficas de intervalos de confianza y efectos principales para la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado (días).

En la tabla V, se observa los resultados obtenidos del ANOVA un solo factor con la variable Tipo de mortero, el Valor p es mayor a 0,05 por lo tanto se acepta la hipótesis nula, es decir, no hay evidencia estadística que exista diferencias significativas entre la resistencia de los diferentes morteros, mientras que el Valor F indica variabilidad baja entre los días de medición en comparación con la variabilidad dentro de cada grupo de dosificaciones.

Para este análisis se realizan dos pruebas post hoc: Dunnet debido que compara el mortero de control (MT1) con cada uno de las dosificaciones (MR2, MR3, MR4) y MCB de HSU que permite identificar la mejor dosificación en términos de resistencia.

TABLA V
ANOVA DE UN SOLO FACTOR: RESISTENCIA VS. TIPO DE MORTERO

Hipótesis		Información del factor			
Hipótesis nula:		Factor Niveles Valores Muestra 4 MR2; MR3; MR4; MT1			
Todas las medias son iguales					
Hipótesis alterna:					
No todas las medias son iguales					
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$					
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor p
Muestra	3	114,3	38,09	1,08	0,413
Error	8	283,4	35,43		
Total	11	397,7			

La Figura 12 muestra que los intervalos de confianza del 95% para la resistencia a la compresión se intercalan entre los distintos tipos de mortero, lo que indica ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto concuerda con el resultado del ANOVA ($p = 0.413$). Sin embargo, MR4 destaca por tener valores cercanos al mortero tradicional (MT1), lo que refuerza su viabilidad como alternativa sostenible sin comprometer el rendimiento estructural.

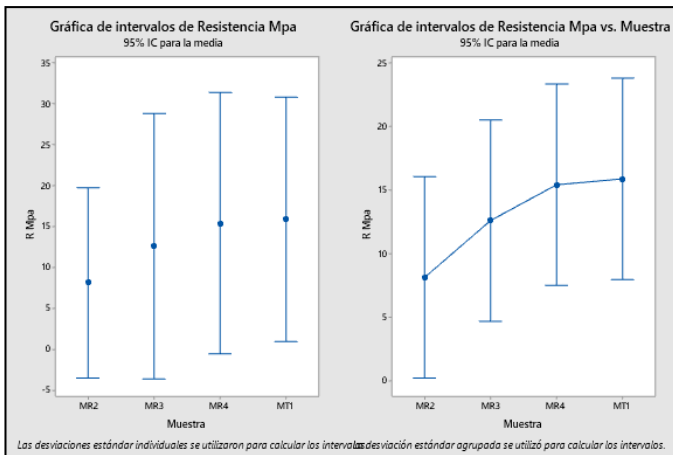


Fig. 12 Gráficas de intervalos de confianza del 95% para la resistencia a la compresión según el tipo de mortero (MR2, MR3, MR4 y MT1).

De acuerdo con la prueba de Dunnett no hay evidencia estadísticamente significativa de que el tipo de mortero sea diferente al grupo de control, es decir el grupo tratado no presenta una diferencia estadísticamente significativa en comparación con el grupo de control.

TABLA VI
PRUEBAS SIMULTANEAS DE DUNNET CON UN CONTROL.

Agrupar información utilizando el método de Dunnet y una confianza de 95%					
Muestra	N	Media	Agrupación		
MT1 (control)	3	15,89	A		
MR4	3	15,43	A		
MR3	3	12,61	A		
MR2	3	8,13	A		
Las medias no etiquetadas con la letra A son significativamente diferentes de la media del nivel de control.					
Pruebas simultáneas de Dunnet para la media del nivel Control					
Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
MR2-MT1	-7,76	4,86	(-21,75; 6,23)	-1,60	0,320
MR3- MT1	-3.28	4,86	(-17,27; 10,71)	-0.67	0,840
MR4- MT1	-0,47	4,86	(-14,46; 13,53)	-0,10	0,999
Nivel de confianza individual = 97,95%					

En la Tabla VII se muestran los resultados de la prueba de MCB de Hsu para seleccionar la dosificación que produce mayor resistencia, los resultados indican el mortero MT1, y MR4, como objetivo de esta investigación es seleccionar el mortero reciclado con mejor resistencia para su réplica en paneles utilizados en la prueba de medición acústica en la cámara reverberante.

TABLA VII
COMPARACIONES MÚLTIPLES CON EL MEJOR MCB DE HSU

Pruebas simultáneas de Hsu para la media de nivel - La mayor de las medias de otros niveles					
Diferencia niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
MR2-MT1	-7,76	4,86	(-19,50; 3,98)	-1,60	0,163
MR3- MT1	-3,28	4,86	(-15,02; 8,46)	-0,67	0,472
MR4- MT1	-0,47	4,86	(-12,21; 11,28)	-0,10	0,715
MT1- MR4	0,47	4,86	(-11,28; 12,21)	0,10	0,715
Nivel de confianza individual = 95,79%					

B Ensayo de Medición acústica.

En esta prueba se selecciona el mortero con dosificación MR4 escogida a través de la prueba estadística MCB de Hsu como la que maximiza la resistencia comparada con las demás.

Para calcular el tiempo de reverberancia (RT60) en la caja de medición acústica, se utilizó la ecuación de Sabine, que establece una relación entre el volumen del espacio, el área de las superficies reflectantes y el coeficiente de absorción del material. El volumen de la caja se calcula multiplicando sus

dimensiones (80 cm de ancho, 80 cm de largo y 40 cm de alto), lo que da un volumen de 0.256 m³. El área total de las superficies reflectantes se obtiene sumando el área de las 6 caras de la caja, resultando en 2.56 m². Para el coeficiente de absorción, se asumió un valor promedio de 0.15, que representa las propiedades acústicas de materiales como la madera, que no absorben mucho sonido. Con estos parámetros, se puede calcular el RT60 utilizando la fórmula de Sabine:

$$RT60 = \frac{0,161 \times V}{A \times \alpha} \quad (1)$$

donde V es el volumen del espacio en metros cúbicos, A es el área total de las superficies reflectantes en metros cuadrados y α es el coeficiente de absorción promedio del material.

El tiempo de reverberancia calculado, utilizando la ecuación de Sabine, fue de aproximadamente 0.107 segundos. Este resultado refleja el tiempo que tarda el sonido en decaer 60 decibelios desde su intensidad máxima dentro de la caja, lo que indica un entorno acústico con una ligera absorción. Un RT60 tan corto sugiere que las superficies de la caja reflejan el sonido rápidamente, lo cual es característico de espacios pequeños o de materiales con baja capacidad de absorción acústica. Este tiempo de reverberancia es crucial para la interpretación de los resultados en las pruebas acústicas de los morteros, ya que permite entender cómo las características del espacio influyen en la propagación y absorción del sonido en comparación con los diferentes tipos de mortero.

TABLA VIII
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS POR TIPO DE AISLANTE

TIPO AIS	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
AIS1	78,793	8,780	11,14	47,000	89,500
AIS2	75,553	10,814	14,31	41,900	85,800
AIS3	82,019	10,389	12,67	48,200	93,300

En la tabla VIII, se muestra el análisis de los resultados estadísticos obtenidos para los tres tipos de aislamiento acústico (AIS1-concreto tradicional, AIS2 – concreto modificado y AIS3-sin recubrimiento) demuestra su influencia en la disminución del ruido dentro de la caja acústica. AIS3 presenta la media más alta de 82,019 dB, lo que sugiere una menor capacidad para reducir el ruido, ya que los valores de nivel de sonido medidos son más elevados. A pesar de esto, su coeficiente de variación (12,67%) indica un comportamiento moderadamente estable.

AIS1, con una media de 78,793 dB y el menor coeficiente de variación (11,14%), evidencia un rendimiento más consistente y ligeramente mejor en cuanto a la reducción del ruido en comparación con AIS3. Su menor dispersión muestra que los resultados obtenidos son más estables y uniformes dentro de la caja.

AIS2, a pesar de tener la media más baja de 75,553 dB, lo que sugiere una mejor reducción del ruido, presenta una mayor variabilidad en sus mediciones, como lo indica su coeficiente de variación de 14,31%. Este comportamiento indica que el aislamiento no es tan uniforme como los otros tipos evaluados, aunque en promedio logra mayores niveles de reducción acústica.

Para verificar la validez de los supuestos estadísticos aplicables a los datos de nivel de ruido obtenidos en los ensayos acústicos, se realizó una prueba de normalidad utilizando el método de Kolmogórov-Smirnov, cuyos resultados se presentan en la Figura 13. Se observa una desviación evidente de los puntos con respecto a la línea de referencia, especialmente en los extremos. El resultado estadístico arrojó un valor p < 0,010, lo que indica que los datos no siguen una distribución normal.

En consecuencia, se optó por aplicar pruebas estadísticas no paramétricas, específicamente Kruskal-Wallis para la comparación entre tratamientos, y Dunn-Bonferroni como análisis post hoc, con el fin de garantizar la robustez y validez de las conclusiones inferenciales.

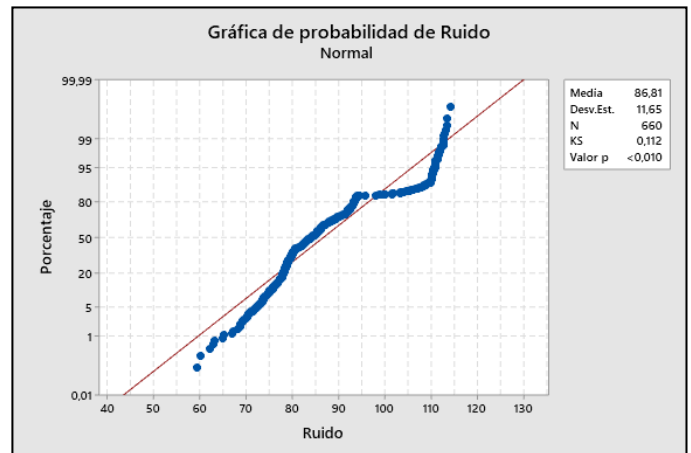


Fig. 13 Gráficas de intervalos de confianza del 95% para la resistencia a la

TABLA IX
PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS

Hipótesis nula	Ho: Todas las medianas son iguales entre AIS1, AIS2 y AIS3.		
Hipótesis alterna	Al menos una mediana es significativamente diferente entre los grupos		
Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	2	69,07	0,000
Ajustado para empates	2	69,08	0,000

Dado que el valor p = 0,000 mostrado en la tabla IX, es menor que el nivel de significancia ($\alpha=0,05$), se rechaza la hipótesis nula (H₀). Esto indica que existen diferencias significativas entre las medianas de los niveles de ruido

correspondientes a los tres tipos de aislamiento acústico (AIS1, AIS2 y AIS3).

El resultado de la prueba Kruskal-Wallis confirma que al menos uno de los aislamientos (AIS1, AIS2 o AIS3) tiene una mediana de nivel de ruido significativamente diferente a los demás. Para identificar qué aislamiento presenta diferencias específicas, se recomienda realizar una prueba de comparaciones múltiples post hoc, como la prueba de Dunn-Bonferroni, que se muestra en la tabla X a continuación:

TABLA X
PRUEBA DE BONFERRONI

Col Mean Row Mean	AIS2	AIS3.
AIS2	3.061821	0.0033*
AIS3	-5.160930	-8.222751
	0.0000*	0.0000*

$\alpha = 0.05$

Reject H_0 if $p \leq \alpha/2$

AIS3 (sin recubrimiento) tiene los niveles de ruido más altos, lo que indica que no es tan efectivo en la atenuación del sonido en comparación con AIS1 (recubrimiento normal) y AIS2 (mortero modificado).

Entre AIS1 y AIS2, ambos muestran diferencias significativas, y la decisión sobre cuál es más efectivo dependerá de cuál tenga el menor nivel de ruido. Si AIS2 (mortero modificado) tiene un nivel de ruido más bajo que AIS1 (recubrimiento normal), entonces AIS2 sería el más efectivo en la reducción del ruido.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la ANOVA de un solo factor con la variable días muestran que existe una diferencia significativa en la resistencia a la compresión de los morteros con el tiempo de curado. Se observa que el tiempo de curado de 28 días presenta la mayor resistencia, seguida por 21 días y 3 días, lo que refuerza la importancia del tiempo de curado en el desarrollo de la resistencia del mortero. Esto está en línea con las expectativas de que el mortero sigue endureciéndose con el paso del tiempo, mejorando sus propiedades mecánicas.

En cuanto a la resistencia a la compresión, los resultados obtenidos para los morteros modificados (MR2, MR3, MR4) en comparación con el mortero tradicional (MT1) no muestran diferencias estadísticamente significativas. A pesar de que MR4 presentó una resistencia de 19,32 MPa a los 28 días, la comparación con MT1 no reveló una variación significativa en los resultados (valor $p = 0,999$ en la prueba de Dunnett). Sin embargo, el desempeño de MR4 se destaca por su capacidad para mantener una resistencia similar a la del mortero tradicional, lo que lo hace una opción viable para aplicaciones en construcción, sin comprometer su integridad estructural.

El análisis de la resistencia a la compresión en función de los días (3, 21 y 28 días) muestra que el tiempo de curado tiene un impacto significativo en la resistencia del mortero (valor $p = 0,004$ en ANOVA). Esto indica que la resistencia de los morteros aumenta de manera notable con el tiempo de curado, lo que es relevante para la planificación de la construcción y la determinación de tiempos óptimos de fraguado.

Los análisis realizados para los niveles de ruido en la caja acústica indican que AIS3 (sin recubrimiento) presenta los niveles de ruido más altos, lo que sugiere que no es tan efectivo en la atenuación del sonido como AIS1 (recubrimiento normal) y AIS2 (mortero modificado). Entre AIS1 y AIS2, se observan diferencias significativas, pero el comportamiento de AIS2 (mortero modificado) es más estable, a pesar de una mayor variabilidad en sus mediciones. En términos generales, AIS2 parece ser el más efectivo en reducir el ruido, aunque AIS1 también muestra buenos resultados con una menor dispersión en sus mediciones.

REFERENCIAS

- [1] Construcción, A. M. (2021). "Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2021". Suiza. Obtenido de <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>
- [2] GrowingBuildings. (30 de 03 de 2019). Obtenido de <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/#:~:text=Cada%20tonelada%20de%20cemento%20en,de%20CO2%20a%20la%20atm%C3%B3sfera>
- [3] MG Andrade, M. Calero, V. Barriga y BR Córdova, "Relación entre el ruido urbano y el tránsito vehicular en la ciudad de Guayaquil", de 16 Multiconferencias Internacionales LACCEI de Ingeniería, Educación y Tecnología: "Innovación en Educación e inclusión", Lima, 2018.
- [4] J. Pluas, MG Andrade y V. Barriga, "Causas, efectos del ruido en el Hospital Básico de Daule y propuesta de medida de control", de 16 Multiconferencias Internacionales LACCEI de Ingeniería, Educación y Tecnología: "Innovación en Educación e inclusión", Lima, 2018.
- [5] L. Arteaga, V. Pilco, V. Barriga y MG Andrade, "Análisis de la funcionalidad sonora del parque Clemente Yerovi de la ciudad de Guayaquil." Ingeniería Química y Desarrollo, vol. 2, n° 1, pp. 7-12, Junio 201, ISSN 1390 - 9428
- [6] Pérez, SP, Valdera, JD, Bustamante, JS y Paredes, RG (2021). "Uso Del Caucho De Neumáticos Triturados Y Aplicados Al Concreto: Una Revisión Literaria", <https://doi.org/10.33789/talentos.8.1.142>.
- [7] Andrade, M., Gaibor, G., Martínez, J., & Martillo, J. (2021). Propiedades del mortero cementicio utilizando caucho reciclado como agregado. Actas de la 19.ª Multiconferencia Internacional LACCEI para Ingeniería, Educación y Tecnología: "Prospectiva y tendencias en tecnología y habilidades para el desarrollo social sostenible" "Aprovechando las tecnologías emergentes para construir el futuro"
- [8] INEC, «Estadísticas de edificaciones,» Ecuador, 2023. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/edificaciones/>
- [9] Leal, L.Á., Cervera, KP, & Flores, PJ (2019). "Aprovechamiento del grano de caucho reciclado para la elaboración de adoquines ecológicos como alternativa a la industria constructiva". Revista

- [10] Serrano, T., Borrachero, M., Monzó, Jm, & Payà, J. (2012). “Morteros Aligerados Con Cascarilla De Arroz: Diseño De Mezclas Y Evaluación De Propiedades”. *Dina*, 79 (175), 128-136.
- [11] Moreno, DD, Ribeiro, S., & Saron, C. (2020). Compatibilización de agregados de caucho reciclado en mortero. *Materiales y Estructuras*, 53.
- [12] Torres Giraldo, D. (2018). Caracterización de la cascarilla de arroz y extracción de celulosa. Universidad de los Andes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/39503>
- [13] Geok Wen Leong, Tze Ming Chin, Kim Hung Mo, Zainah Ibrahim, Azma Putra, Muhammad Nur Othman, Incorporation of crumb rubber and air-entraining agent in ultra-lightweight cementitious composite: Evaluation of mechanical and acoustic properties, *Journal of Building Engineering*, Volume 42, 2021, 103034, ISSN 2352-7102, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221008925>)
- [14] Garcia-Troncoso, N., Hidalgo-Astudillo, S., Rivas-Fermin, A., Mogro-Montilla, F., & Garces-Ross, G. (2023). IMPLEMENTACION DE CENIZA DE CAÑA DE AZUCAR EN EL DESARROLLO DE MORTEROS DE REPARACION VIAL IN SITU. Proceedings of the 21th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2023): “Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development”.
- [15] N Holmes, A.Browne, C. Montague, “Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement”. *Construction and Building Materials*, Volume 73, 2014, Pages 195-204, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814011234>)
- [16] Olvera-Martínez, MD, López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, JB y Horta-Rangel, J. (2023). Desarrollo de un Panel con Caucho Reciclado para Mejorar la Absorción Acústica. *Ciencia Nicolaita*
- [17] Silupu, JW, Franco, JE, Gutiérrez, RE y Pary, CA (2020). Efecto de la Utilización de Agregados de Concreto Reciclado sobre el Ambiente y la Construcción de Viviendas en la Ciudad de Huamachuco. *PURIQ*.
- [18] Cueva, LA y Solís, JA (2020). Propuesta de concreto eco-sostenible con la adición de caucho reciclado para la construcción de pavimentos urbanos en la ciudad de Lima.
- [19] Berrezueta, A., & Mauricio, P. (2005). Utilización de cascarilla de arroz en la elaboración de ladrillos y de alta resistencia.
- [20] Chinga-Caicedo, RA, Mera-Zambrano, CJ y Guerra-Mera, JC (2024). Repercusión del uso de la cascarilla de arroz en la elaboración de bloques para las aligeradas. *MQRInvestigar*.
- [21] Centeno, SD y Rodríguez, BJ (2018). Evaluación del uso de los Residuos de cascarilla de arroz (*Oryza sativa* L.) como agregados en bloques para la construcción.
- [22] Rojas, H. y Fernando, D. (2019). Obtención y caracterización de nanopartículas de sílice a partir de la cascarilla de arroz para estudiar el efecto de su inclusión en las propiedades de las placas de fibrocemento.
- [23] Norma UNE-EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [24] Contreras, E., Andrade, M., Troya, F. y Huilcarema, J. (2022). Bricks with fibers from sugar cane bagasse for their viability in the construction of masonry. *Actas de la 20.ª Multiconferencia Internacional LACCEI para Ingeniería, Educación y Tecnología: «Educación, Investigación y Liderazgo en Ingeniería Pospandémica: Acciones Resilientes, Inclusivas y Sostenibles»*.