



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 2, Mayo · Julio 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA

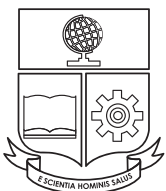


**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 2, Mayo · Julio 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)

## TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, creada en el año 1961, siendo la primera revista científica ecuatoriana, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados con las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

### EDITORIA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.  
*Escuela Politécnica Nacional*  
editor.rp@epn.edu.ec

### CO-EDITOR

Benjamin Bernard, Ph.D.  
*Escuela Politécnica Nacional*  
coeditor.rp@epn.edu.ec

### CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. José Luis Paz  
*Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú*

Ph.D. Hernán Álvarez  
*Universidad Nacional Colombia, Colombia*

Ph.D. Majid Khorami (C)  
*Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador*

Ph.D. Nelson Pérez  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers  
*University of Technology, Suecia*

Ph.D. Hugo Leiva  
*Yachay Tech University, Ecuador*

Ph.D. Franklin Rivas  
*Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile*

Ph.D. Carlos Ávila  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Francisco León  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Andrés Rosales  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Leonardo Basile  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Orestes Llanes  
*Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba*

Ph.D. Gabriel Salazar  
*Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador*

Ph.D. Silvia Calderón  
*Finnish Meteorological Institute, Finlandia*

Ph.D. Wilfrido A. Moreno  
*University of South Florida, Estados Unidos*

Ph.D. Gustavo Scaglia  
*Universidad Nacional de San Juan, Argentina*

Ph.D. Eduardo F. Camacho  
*Universidad de Sevilla, España*

Ph.D. Diego Ordóñez  
*Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador*

Ph.D. Hebert Sira-Ramirez  
*Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México*

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Rui Pedro Paiva  
*University of Coimbra, Portugal*

Ph.D. Sebastián Taco  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Pamela Flores  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

La Revista Politécnica está incluida en diferentes índices, siendo los principales SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

#### *Coordinador Técnico Operativo*

Ing. Ricardo Villarroel  
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

MSc. Karina Játiva  
karina.jativa@epn.edu.ec

#### *Proofreader*

MSc. María Eufemia  
Torres

#### *Diseño de Portada*

Cristian Basurto  
Diseñador Gráfico

## AUTORIDADES

### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrector de Investigación,  
Innovación y Vinculación**  
Marco Santórum, Ph.D.

**Rector**  
Tarquino Sánchez, Ph.D.

**Vicerrectora de Docencia**  
Valentina Ramos, Ph.D.

## **Mujer en la ingeniería, nunca más una utopía**

El 23 de junio se celebra el día internacional de la mujer en la ingeniería. Esta fecha destaca la presencia de la mujer ingeniera, visibiliza su contribución en el desarrollo tecnológico y aporta a su continua lucha por la igualdad de género. Sin duda, la participación histórica de la mujer en los últimos años en la ingeniería ha abierto el camino para futuras generaciones que sueñan también con ejercer esta profesión.

El día internacional de la mujer en la ingeniería fue impulsado por la WES, Sociedad de Mujeres Ingenieras, en el 2014 y reconocido por la UNESCO en el 2016. La WES nace en el año 1919 en Reino Unido y tiene como propósito impulsar y capacitar a las mujeres que se preparan en este ámbito. La creación de esta organización promovió la formación y el empleo de mujeres en puestos de ingeniería durante la Primera Guerra Mundial, cuando por primera vez y ante la ausencia de hombres, se incentivó a las mujeres a utilizar sus habilidades técnicas en conflictos bélicos. Sin embargo, la Ley de Restablecimiento de las Prácticas de Penguerra de 1919 obligó a las mujeres a renunciar a sus puestos en favor de los militares que regresaban. Muchas lo consideraron injusto, y aunque la mayoría regresó a las tareas domésticas, un pequeño número decidió aprovechar la formación que les había proporcionado la guerra y seguir ejerciendo su rol de ingenieras.

Ciento cinco años después, en el Ecuador, el 40% de las mujeres se encuentra matriculada en carreras científicas y solo un 30% de los puestos de trabajo en los campos de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas es ocupado por mujeres. Aunque son porcentajes históricos, muestra una brecha que necesita ser saldada. El impulso de políticas que fomenten la participación de las mujeres en la fase académica y profesional permitirá la eliminación de barreras económicas, de género, sociales y culturales que limitan el acceso a la educación superior y una mejor calidad de vida. Es momento que la participación de la mujer en la ciencia deje de ser una excepción, sino que se convierta en una norma.

Desde la Revista Politécnica nos unimos a este homenaje e impulsamos a la mujer ecuatoriana a continuar en esta incansable lucha, por medio de la investigación, con soluciones efectivas e innovadoras, como es el caso del artículo principal de este nuevo volumen que lleva como título “Entomoremediación: Influencia de una Dieta Plástica en el Desarrollo de Tenebrio Molitor para Generar Biofertilizante” y tiene como autora única a una mujer. Este nuevo número que incluye artículos de las áreas de ingeniería civil, sistemas, química, agroindustria y electrónica, evidencia una notable participación de la mujer. Con un total de 34 autores, 10 son mujeres.

El consejo editorial de Revista Politécnica agradece a los autores y revisores por su confianza y felicita y promueve la participación de la mujer investigadora en nuestras próximas ediciones. Por nuestra parte, nos comprometemos a seguir elevando los estándares de calidad de la publicación científica tanto a nivel nacional como internacional.

## **Women in engineering, no longer a utopia**

On June 23rd, the International Day of Women in Engineering is celebrated. This date highlights the presence of women engineers, makes visible their contribution to technological development and contributes to their continuous struggle for gender equality. Undoubtedly, the historical participation of women in engineering in recent years opens the way for future generations who also dream of practicing this profession.

The International Women in Engineering Day was promoted by WES, Women Engineers Society, in 2014 and recognized by UNESCO in 2016. The WES was born in 1919 in the United Kingdom and its purpose is to promote and train women who prepare themselves in this field. The creation of this organization promoted the training and employment of women in engineering positions during the First World War, when for the first time and in the absence of men, women were encouraged to use their technical skills in war conflicts. However, the Prewar Practices Restoration Act of 1919 forced women to relinquish their positions in favor of returning servicemen. Many felt this was unfair, and although most returned to domestic duties, a small number decided to take advantage of the training the war had given them and continue to practice as engineers.

One hundred and five years later, in Ecuador, 40% of women are enrolled in scientific careers and only 30% of jobs in the fields of science, technology, engineering and mathematics are held by women. Although these are historical percentages, it shows a gap that needs to be closed. The promotion of policies that encourage the participation of women in the academic and professional phase will allow the elimination of economic, gender, social and cultural barriers that limit access to higher education and a better quality of life. It is time for women's participation in science to stop being an exception and become the norm.

From the Revista Politecnica we join this tribute and encourage Ecuadorian women to continue in this tireless struggle, through research, with effective and innovative solutions, as is the case of the main article of this new volume entitled "Entomoremediation: Influence of a Plastic Diet on the Development of Tenebrio Molitor to Generate Biofertilizer" and whose sole author is a woman. This new issue, which includes articles in the areas of civil engineering, systems, chemistry, agroindustry, and electronics, shows a notable participation of women. With a total of 34 authors, 10 are women.

The editorial board of Revista Politecnica thanks the authors and reviewers for their confidence and congratulates and encourages the participation of women in our next editions. For our part, we are committed to continue raising the quality standards of scientific publication both nationally and internationally.

**Contenido**  
**Vol. 53, No. 2**  
**Mayo - Julio 2024**

7

Bastidas-Proaño, Daniela

**Entomoremediación: Influencia de una Dieta Plástica en el Desarrollo de Tenebrio Molitor para Generar Biofertilizante**

*Entomoremediation: Influence of a Plastic Diet on the Development of Tenebrio Molitor to Generate Biofertilizer*

17

Chaname, Josef; García, Juan; Arriola, Guillermo

**Improvement of the Mechanical Properties of Structural Concrete Using Microporous Ethylene Vinyl Acetate**

*Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas del Concreto Estructural Utilizando Microporoso Etileno Acetato de Vinilo*

27

Tuárez-Párraga, Miguel Alejandro; Laz-Mero, Mabel; Córdova-Mosquera, Alexandra;  
Panchana-Cedeño, Ramona; Gavilánes-López, Pablo; Solórzano Zambrano, Liceth

**Permeabilidad al Oxígeno en Envases para Alimentos Fabricados con Polipropileno Mediante Moldeo por Inyección**

*Oxygen Permeability in Food Packaging made of Polypropylene by Injection Molding*



37

Torres-Hoyer, Roberto; Peña, Jackeline; Millalén, Fernanda; Picón, Ricardo; Barreto, Wilmer;  
Peña, Oswaldo; Torres-Hoyer, Jesús

**Reducción del Impacto Ambiental con Desechos Industriales en Pavimentos por Análisis del California Bearing Ratio**

*Environmental Impact Reduction with Industrial Waste in Pavements by California Bearing Ratio Analysis*

47

Zapata-Ochoa, Edison-Andres; López-Giraldo, Francisco-Eugenio; García-Pineda, Vanessa

**Análisis de las Antenas Microcinta para Cosecha de Energía Electromagnética Radiada**

*Analysis of Microstrip Antennas for Wireless Energy Harvesting*

59

Cárdenas, Fausto; Villegas, José; Hernández Rodríguez, Luis Tinerfe; Guaminga, Edwin;  
Herrera, Melisa

**Estudio Experimental de Conectores Tipo Ángulo en Vigas Compuestas de Acero y Hormigón**

*Experimental Study of Angle Type Connectors in Steel and Concrete Composite Beams*

69

Navia, Marlon; Chancay-García, Leonardo; Cedeño-Sarmiento, Cristhian; Mendoza-Briones,  
Duglas

**A Systematic Literature Review about Sensors Systems and Applications for Livestock Vital Signs Monitoring**

*Revisión Sistemática de Literatura sobre Sistemas de Sensores para Monitorización de Signos Vitales en Ganado*

79

Bereche, Jhan; García, Juan

**Replacement of Fine Aggregate with Refractory Brick Residue in Concrete Exposed to Elevated Temperatures**

*Reemplazo del Agregado Fino por Residuo de Ladrillo Refractario en Concreto Expuesto a Elevadas Temperaturas*

89

Farfan, J. Alex; Quispe, Yuan; Vildoso, Alejandro

**La Evaluación Fisicomecánica del Concreto al Adicionar Cenizas del Tallo de Algarrobo para Pavimentos Rígidos - Ayacucho, Perú**

*The Physicomechanical Evaluation of Concrete by Adding Carob Stem Ash for Rigid Pavements - Ayacucho, Peru*


97

Jiménez-Montoya, Adán; Pascual-Francisco, Juan Benito; Sánchez-Cruz, Gabriela; Ríos-Ledezma, María Guadalupe; Novelo-Ramos, Jael Kaleb; Matías-Molina, Ana Laura

**Una Revisión de Ladrillos de Suelo y Cemento con Refuerzos Diversos**

*Soil and cement bricks with diverse reinforcements: A Review*

# Entomoremediación: Influencia de una Dieta Plástica en el Desarrollo de Tenebrio Molitor para Generar Biofertilizante

Bastidas-Proaño, Daniela<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Biológicas, Quito, Ecuador

**Resumen:** El plástico es ampliamente utilizado y responsable de impactos ambientales negativos. Tal es el caso del poliestireno expandido (EPS), que presenta desafíos de revalorización por su baja densidad. Aunque ciertas larvas de insecto, como tenebrio molitor, han demostrado la capacidad de mineralizar plásticos, la insecticultura de estos aún se enfoca en obtener proteína sostenible y biofertilizante. En este estudio, se investiga la influencia de una dieta de EPS en el desarrollo larval de *T. molitor* durante 6 meses, y se examina cómo la dieta afecta el volumen de biofertilizante recolectado en este lapso. Se desarrollaron ensayos con tres dietas, realizando mediciones y recolección de material de manera periódica. Los resultados indican que las larvas alimentadas con un sustrato combinado, así como aquellas con una dieta orgánica, demuestran tasas de supervivencia de hasta 66%. La longitud final es inferior en la dieta inorgánica (112mm), y en las otras dietas superan los 162 mm. Las larvas de una dieta inorgánica no progresaron a pupa, demostraron un Factor de Conversión de Alimento desalentador (3,87) y produjeron menor cantidad de frass/biofertilizante (1,28g), en comparación con la dieta combinada que registró 5,11g. Los datos sugieren que la entomoremediación plástica funciona óptimamente si se cría larvas en un sustrato combinado de EPS y elementos orgánicos. Dicha condición no solo produce resultados positivos, sino que se alinea con los principios de economía circular. En consecuencia, se demuestra que una dieta combinada es ideal para abordarla como opción en el tratamiento de residuos de EPS.

**Palabras clave:** Entomoremediación, Frass, Insecticultura, Poliestireno expandido, Residuos plásticos

## Entomoremediation: Influence of a Plastic Diet on the Development of Tenebrio Molitor to Generate Biofertilizer

**Abstract:** Plastic is widely used and responsible for negative environmental impacts. Such is the case of expanded polystyrene (EPS), a material that presents revaluation challenges due to its low density. The ability of certain insects larvae, such as *Tenebrio molitor*, to mineralize plastic has been demonstrated, although its insect farming still focuses on obtaining sustainable protein and biofertilizer. This study investigates the influence of an EPS diet on the larval development of *T. molitor* for 6 months and examines how the diet affects the volume of biofertilizer collected in this period. Trials were developed with three diets, performing periodic measurements and collection of material. The results indicate that larvae fed a combined substrate, as well as those fed an organic diet, demonstrate survival rates of up to 66%. The final length is lower in the inorganic diet (112 mm), and in the other diets it exceeds 162 mm. Larvae on an inorganic diet did not progress to pupal stage, demonstrated a disappointing lowest Feed Conversion Ratio (3.87) and produced less frass (1.28g), compared to the combined diet which recorded 5.11g. The data suggest that plastic entomoremediation works optimally if larvae are raised on a combined diet substrate of EPS and organic elements. This condition not only produces positive results, but also is aligned well with the principles of the circular economy. Therefore, a combined diet proves to be an ideal candidate for tackling EPS waste.

**Keywords:** Entomoremediation, expanded polystyrene, frass, insecticulture, plastic waste

### 1. I INTRODUCCIÓN

En el mundo, el plástico ha adquirido un rol dominante, a tal punto que es uno de los materiales más usados y versátiles. Es tal su importancia que el año 2016 su producción alcanzó la

cifra de 242 millones de toneladas, y para el 2030 se espera que esa cifra aumente en un 40% (Haque, 2019). Lamentablemente, a causa de la pandemia de COVID-19, los proyectos y esfuerzos que se realizaban por reducir la producción de plástico, se vieron reducidos a causa de la

\*ddbastidas@uce.edu.ec; danidome.25@gmail.com

Recibido: 22/11/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.01

CC 4.0

emergencia sanitaria (Patrício et al., 2020). A pesar de tener una importante utilidad, el hecho que el plástico no sea un material biodegradable es una desventaja. Es por ello que su acumulación en el ambiente genera una preocupación considerable.

Las características de los plásticos hacen factible que los residuos se acumulen en vertederos, y en muchos de los casos, terminen afectando ecosistemas como los cuerpos de agua. Además, no solo los residuos plásticos generan contaminación, sino que el ambiente se ve afectado por la presencia de aditivos químicos, los mismos que se colocan en este material, y a los propios procedimientos de producción, reciclaje y desecho del plástico. Estos procedimientos, si no se regulan eficazmente, no solo representan adversidades ambientales, sino que pueden impactar la salud humana e incluso mercados económicos mundiales (Batatineh, 2020; Chen et al., 2021; Lebreton y Andrady, 2019).

En Ecuador, la generación de residuos *per capita* alcanza los 0,58Kg al día, de estos el 11% corresponde a una fracción plástica. Lamentablemente, esta fracción plástica, como el resto de los residuos, se dispone mayoritariamente en vertederos a cielo abierto (Solíz, 2015). Solo un pequeño porcentaje, el 3,7% de los residuos, se aprovecha gracias al trabajo de recicladoras de base (Solíz, 2015), pero esta labor aún resulta insuficiente para abordar el problema de acumulación de residuos plásticos.

Desde hace algunos años se planteó el uso de metodologías biotecnológicas para buscar soluciones sostenibles y efectivas para el tratamiento de desechos plásticos. Entre estas herramientas está el manejo de microbiota intestinal de invertebrados como los insectos (An et al., 2023; Tan et al., 2021; Yang et al., 2015).

Pero no todos los materiales plásticos son susceptibles a revalorización en un tratamiento sostenible, económicamente viable o fácilmente accesible. Entre estos materiales se encuentra el Poliestireno Expandido (EPS), un plástico comúnmente usado como contenedor térmico y que, debido a su baja densidad, no es atractivo para procesos tradicionales de reciclaje o revalorización (Arriola y Velásquez, 2013; Cella et al., 2018; Haque, 2019; Ramli et al., 2019).

En relación con esto, Gan et al. (2021), Jiang et al. (2021) y Yang et al. (2015) demostraron que algunos insectos son capaces de mineralizar plástico a través de su tracto digestivo. Los géneros de escarabajo (Coleóptera), *Tenebrio* y *Zophobas*, son los que más destacan.

Actualmente, parte de la insecticultura se enfoca en satisfacer un mercado creciente de alimentos sostenibles y altos en proteína, destinados tanto al consumo animal como humano. Este enfoque tiene implicaciones socioeconómicas y ambientales importantes (van Huis et al., 2013).

De manera general, se conoce que la producción a gran escala de insectos genera una huella ambiental menor en comparación de otros animales de granja (Grau et al., 2017; Oonincx et al., 2019). Sin embargo, al igual que otro proceso,

la insecticultura genera residuos. El "frass", una mezcla de fecas, exuvias y restos de alimentos (Official Journal of the European Union, 2021), puede representar hasta 20 veces la producción total de biomasa aprovechable de los insectos criados, ya que solo el 2% del alimento consumido se convertirá en biomasa aprovechable (Blakstad, 2021; Poveda, 2021).

La cría de insectos, al centrarse en la sostenibilidad, abre la posibilidad de utilizar el frass como un biofertilizante en la actividad agrícola, lo que alinea a esta práctica con un modelo de economía circular. El frass contiene proporciones de quitina, que le otorgan propiedades disuasorias de insectos, hongos y nemátodos a las plantas. Incluso, su capacidad natural para proporcionar fósforos y nitrógeno al suelo, lo convierte en una opción importante para fortalecer una agricultura sostenible (Gärtling et al., 2020; Poveda, 2021) y participar en un ciclo de producción circular de biofertilizantes.

Por otro lado, los insectos pueden formar parte de proyectos de entomoremediación. La especie modelo es *Hermetia illucens*, ampliamente estudiada por su efectiva capacidad de bioconvertir residuos sólidos orgánicos (Bulak et al., 2018); y *Tenebrio molitor*, que se conoce que tiene la capacidad de alimentarse de poliestireno y polietileno, y otras especies, puede contribuir a la entomoremediación a través de la degradación de residuos orgánicos o inorgánicos como el plástico (Brandon et al., 2018).

Existen variados estudios que confirman que algunas larvas de insectos son capaces de sobrevivir a una dieta inorgánica plástica (Yang et al., 2023; Zielińska et al., 2021), pero estos no se enfocan en cómo dicha dieta influye en el desarrollo larval, y por ende, en la obtención de frass bajo un sistema de economía circular que involucre residuos plásticos y la biomasa necesarios para obtener biofertilizante.

Por lo tanto, la intención de este estudio es investigar y detallar la influencia de una dieta de poliestireno expandido en el desarrollo de larvas de *Tenebrio molitor*, y determinar cómo dicha dieta influye en el crecimiento y viabilidad larval; y en la obtención de biofertilizante.

## 2. METODOLOGÍA

Este estudio se caracteriza por ser cuantitativo, experimental y longitudinal. La población se consideró infinita, por ello se preparó una muestra de 1200 individuos de larvas de *Tenebrio molitor*, con una edad aproximada de 15 días. Estas larvas se obtuvieron de una granja en Quito. El trabajo se llevó a cabo en esta misma ciudad, por un tiempo que abarcó desde agosto del 2022 hasta enero del 2023.

### 2.2 Tratamientos y dietas

Se clasificaron las larvas en tres tratamientos o dietas (Figura 1).

- 1) Dieta orgánica: alimento a base de avena en hojuelas; 2) Dieta combinada: Formada de 50% de avena y 50%



**Figura 1.** Imágenes de las dietas a las que se sometió larvas de *Tenebrio molitor* por seis meses. La flecha señala a una larva en cada tratamiento.

poliestireno expandido; 3) Dieta inorgánica: conformado en su totalidad por poliestireno expandido.

Debido a las características propias de las larvas de insectos como el tamaño reducido y a la sensibilidad a la manipulación; no es práctico criar elementos de manera individual por un tiempo prolongado. Por ello, cada tratamiento contó con ocho repeticiones en las cuales se incluyeron 50 larvas de *Tenebrio molitor*. Para proveer de hidratación a las larvas, se añadieron pequeños trozos, de hasta 2 gramos de peso, de vegetales previamente desinfectados. Las proporciones de las dietas se midieron con una gramera de dos decimales, y se registraron tanto la cantidad de alimento agregado como la cantidad de residuos extraída en cada repetición.

### 2.3. Cálculos

Con los registros semanales se realizaron los cálculos correspondientes a cada repetición de cada tratamiento. Se calculó, a) Tasa de supervivencia de larvas al tratamiento (*TS*); b) Tasa de pupa (*TP*); c) Tiempo promedio para convertirse en pupa (*TPP*) y d) Factor de conversión de alimento (*FCA*); y se sumó la cantidad en gramos de frass total de cada tratamiento.

$$TS(\%) = \frac{\text{Pupas+larvas vivas}}{\text{Total de larvas al inicio}} * 100 \quad (1)$$

$$TP(\%) = \frac{\text{Número de pupas registradas en el estudio}}{\text{Total de larvas al inicio del estudio}} * 100 \quad (2)$$

$$TPP(\text{días}) = \frac{\text{Fecha inicial del proyecto} - \text{Fecha de registro de pupa}}{\text{Número de pupas}} \quad (3)$$

$$FCA = \frac{\text{Sustrato total consumido por repetición a lo largo del proceso}}{\text{Peso final de la biomasa final por repetición}} \quad (4)$$

### 2.4. Entorno experimental

Los contenedores fueron envases de polietileno oscuro de 500 ml de volumen, sellados con una malla de mosquitero. Estos contenedores se ubicaron en una cámara de cría oscura con un área de 150 cm<sup>2</sup>. La temperatura se controló con un mini calefactor *Handy Heater 400w*, programado para encenderse durante 30 minutos cada 90 minutos. La temperatura y la humedad se registraron utilizando un termohigrómetro con sonda.

### 2.5. Toma de datos y estadística

Los datos se recopilaban en intervalos semanales y abarcaron variables como la tasa de supervivencia y de pupa, el tiempo requerido para que las larvas se convirtieran en pupas, el factor



**Figura 2.** Toma de medidas de la longitud de las larvas de *Tenebrio molitor*. Se colocaron las larvas sobre una superficie milimetrada.

de conversión de alimento (*FCA*) y la cantidad de *frass* producido en cada tratamiento. La longitud de las larvas se midió en milímetros, tomando una muestra al azar de entre 5 y 10 larvas por repetición. Las variables de *FCA* y longitud final, por tener un gran número de datos, se promediaron hasta obtener un valor por repetición de cada tratamiento.

En el momento en el cual se tomaron los datos, también se agregó sustrato húmedo en todos los tratamientos. Se buscaron individuos muertos o pupas, a las que se les cambió de contenedor para evitar depredación y/o contaminación.

Los datos se registraron en hojas de cálculo de Excel 365. Para la estadística se consideró un nivel de significancia de  $p < 0.05$  y un nivel de confianza de 95%. Se realizaron pruebas de normalidad y se utilizaron estos resultados para determinar la prueba estadística más apropiada. Se aplicaron pruebas estadísticas como U de Mann-Whitney, T de Student, ANOVA o Kruskal-Wallis, junto con pruebas post hoc, según corresponda. Para el análisis se utilizó el software BioEstat (Ayres et al., 2007).

El registro de longitud se realizó en milímetros (Figura 2) y se promedió por repetición cada semana.

Los resultados fueron interpretados con el propósito de comprender la influencia de las distintas dietas en el desarrollo de las larvas y la producción de frass, y así poder establecer la efectividad de los diferentes tratamientos en el contexto de una economía circular.

## 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante un periodo de seis meses, se registraron las variables ambientales en la cámara de cría, con promedio de humedad de  $49,27\% \pm 7,8\%$ ; mientras que la temperatura se promedió en  $23,66^\circ\text{C} \pm 9,56$ . Según la Plataforma Internacional para alimentos de Insectos (IPIFF, 2022), para *T. molitor* las condiciones ambientales ideales incluyen una humedad relativa del 70% y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  y que no superen los  $45^\circ\text{C}$ . Para esta investigación, si bien el valor de humedad no alcanza el porcentaje ideal para este parámetro, este valor no influiría en la supervivencia de las larvas. Dado que, a una temperatura cercana a los  $25^\circ\text{C}$ , la humedad no influye directamente en la supervivencia de larvas, pupas y adultos de *T. molitor*. En estas condiciones la supervivencia de cada etapa oscila en el 90% (Mirzaeva et al., 2020).

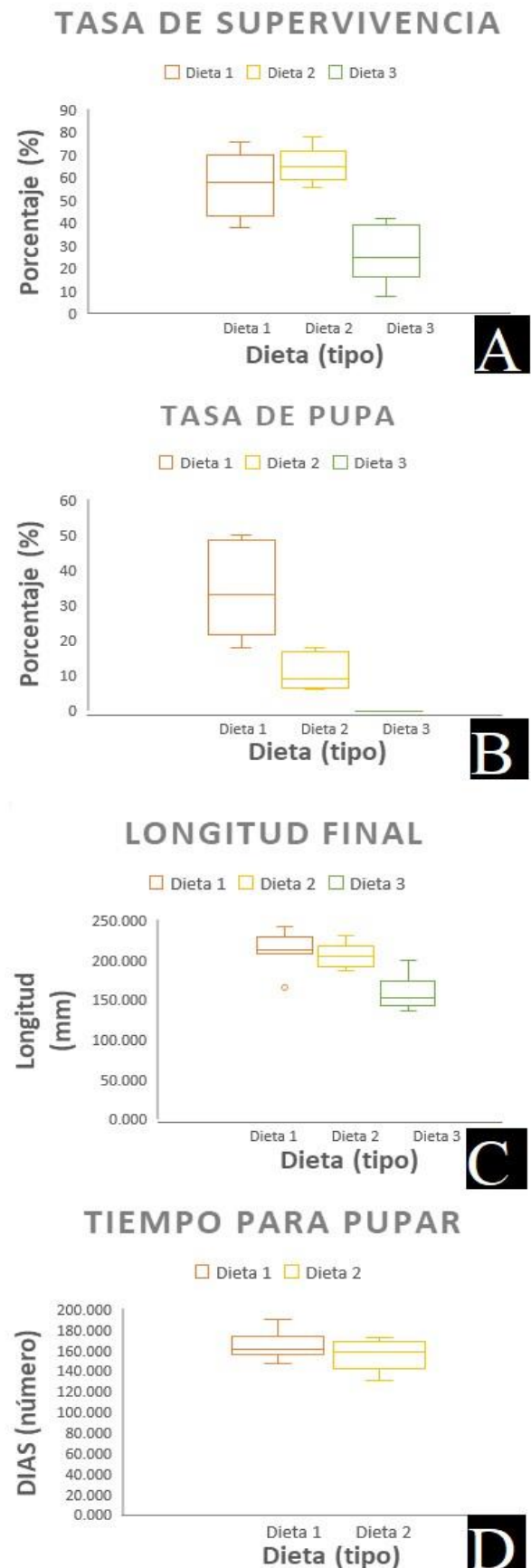
La tasa de supervivencia entre los tres grupos de estudio de *T. molitor*, se evidenció una diferencia significativa ( $p=5,0 \times 10^{-4}$ ). El tratamiento con una dieta totalmente inorgánica presentó un promedio de 26,75%, en comparación con los otros dos tratamientos que alcanzaron valores del 57% y 66% respectivamente para la dieta orgánica y combinada (Figura 3). La tasa de supervivencia es una variable importante en el estudio, debido a que es la variable más evidente para pronosticar y evaluar el sustrato como un elemento viable para el desarrollo de las larvas.

En el trabajo de Yang et al. (2018) en relación con la influencia de una dieta plástica en *T. molitor*: y en otro trabajo con especies de escarabajos como *Zophobas atratus*, se ilustraron tasas de supervivencia entre 75% y 90%. Las diferencias en los porcentajes de supervivencia, entre este y otros trabajos previamente publicados, responden principalmente al periodo de análisis. En esos trabajos se estudió el desarrollo larval durante aproximadamente 30 días (Jiang et al., 2021; Yang et al., 2018) y en etapas larvales más avanzadas. El poco estrés al que las larvas se someten en periodos de investigación cortos, junto con la posibilidad de que las larvas, al no ser jóvenes, acumulen reservas nutricionales y energéticas no limitarían la supervivencia de ellas en los estudios que anteriormente se citó.

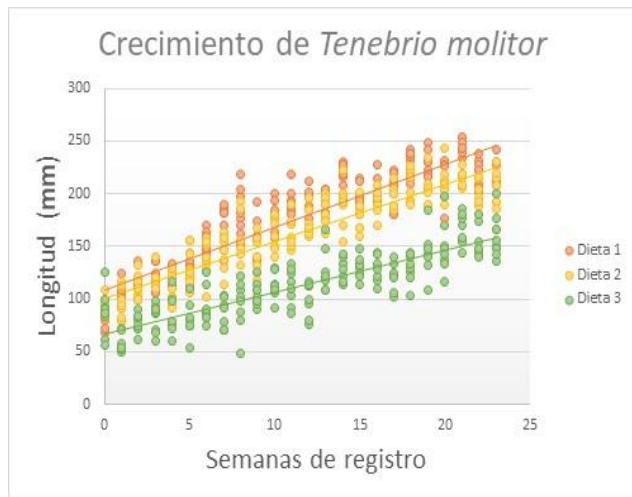
Los insectos holometábolos, como los escarabajos, para completar su ciclo de vida, deben pasar por un estado de pupa (Mondragón, 2021). En esta investigación, no se encontró, ni registró la formación de pupas en las repeticiones sometidas a una dieta inorgánica durante el periodo de seis meses. Al comparar los valores de las dietas orgánica y combinada (ver Figura 3), se determinó una diferencia importante ( $p=6,0 \times 10^{-4}$ ) en la tasa de formación de pupas, con una tasa de 34,25% para los individuos alimentados con una dieta orgánica, y de solo del 11% para las alimentadas con una dieta combinada. En un estudio similar realizado por Lou et al. (2021), donde se observó que el grupo alimentado con salvado y plástico, se registraron porcentajes superiores de larvas que llevaron a la etapa de pupa.

El tiempo necesario para que las larvas se convirtieran en pupa se registró, y no se encontraron diferencias significativas entre los promedios de  $165,06 \pm 13,76$  y  $155 \pm 15,59$  días para los tratamientos de dieta orgánica y dieta combinada, respectivamente (ver Figura 4). En el análisis no se incluyeron valores para la dieta inorgánica, ya que no se formaron pupas en este tratamiento durante el periodo de observación.

La diferencia entre los grupos en la longitud final que alcanzaron las larvas resultó ser significativa (Tabla 1). La longitud promedio inicial para todas las larvas fue de  $113 \text{ mm} \pm 2,952$ . A medida que avanzaba el tratamiento, se evidenció (Figura 3 y 4) una diferencia importante ( $p < 0,01$ ) entre las dietas orgánicas y combinadas con la dieta inorgánica. Dicha diferencia se puede apreciar en la Tabla 1.



**Figura 3.** Representaciones gráficas de las variables de desarrollo larval. A: Tasa de supervivencia para los tratamientos. B: Tasa de larvas que llegaron a pupa en cada tratamiento. C: Diferencia de la longitud final en cada tratamiento. D: Tiempo en días que tardaron las larvas en pupar en las dietas.



**Figura 4.** Descripción del crecimiento en centímetros de la muestra de larvas de cada tratamiento a lo largo de seis meses

Las larvas que se desarrollaron en una dieta totalmente plástica no alcanzaron su etapa de pupa. Este hecho es una respuesta a que las larvas no alcanzan su tamaño ideal, debido a su nutrición, para desencadenar la reacción hormonal que les permite pupar (Truman y Riddiford, 2019). Además, las condiciones ambientales en un sustrato solo de plástico pueden ser difíciles de controlar y mantener en el interior de cada una de las repeticiones. Las últimas etapas de larva y pupa son sensibles a la temperatura (Arbab, 2019). Por esta razón, y junto con la desnutrición larval, se comprende porqué el tiempo larval de este tratamiento se prolonga, a tal punto que no se presentaron individuos en etapa de pupa en seis meses de análisis.

**Tabla 1.** Promedios y desviaciones para las variables de desarrollo larval de cada tratamiento

Dieta	Supervivencia (%)		Pupa (%)	
	valor	p	valor	p
1 Orgánica	57±		34,25±	
	13,69		12,71	
2 Combinada	66±		11±	6,0x10 <sup>-4**</sup>
	7,55		5,01	
3 Inorgánica	26,75±	5x10 <sup>-4*</sup>		
	12,09			
	Tiempo en pupar (Días)		Longitud final (mm)	
1 Orgánica	165,06±		213±	
	13,76		022	
2 Combinada	155±		205±	
	15,59		015	
3 Inorgánica			159±	< 0.01*
			020	

N/S: Diferencias no significantes con otras dietas. \* Diferencia significativa con las otras dos dietas. \*\*Diferencia significativa con la otra dieta

El grupo de larvas sometidas a una dieta completamente inorgánica demostró las tasas más bajas de supervivencia, formación de pupas y crecimiento que se registró. Este hallazgo sugiere que el EPS no proporciona suficientes nutrientes para un desarrollo ideal de las larvas, aunque pueda suplir sus necesidades energéticas (Božek et al., 2017). Además, fue notable que, a pesar de que todas las repeticiones recibieron la misma proporción de alimento fresco y de sustrato de dieta, las larvas en la dieta combinada consumieron

el alimento de manera más voraz. Al contrario, las larvas sometidas a la dieta inorgánica mostraron una tendencia conductual de preferencia por consumir primero el alimento fresco, utilizando el plástico como refugio.

Según Yang et al. (2023), *T. molitor* responde positivamente a una dieta que combine harinas y restos plásticos, lo cual puede atribuirse a la capacidad de las larvas para desarrollar una microbiota intestinal diversa que les permite aprovechar de manera más eficiente los recursos alimenticios disponibles (Lou et al., 2020). En el intestino, se generaría un cambio en el ecosistema bacteriano en respuesta a la inclusión de material inorgánico en la dieta, favoreciendo así a cepas bacterianas menos exigentes y más adaptables a las condiciones ambientales alteradas por el cambio de dieta.

Pero también, una microbiota sometida exclusivamente a una dieta de EPS podría no adaptarse completamente, lo que se suma a la falta de recursos nutritivos en el plástico. De hecho, un estudio concluyó que una dieta plástica disminuye la diversidad del microbioma intestinal en las larvas de otra especie, *Zophobas morio*, y aumenta la proporción de grupos bacterianos patógenos (Sun et al., 2022). La propuesta de que las larvas desarrolladas en una dieta combinada pueden aprovechar mejor los recursos alimenticios se refuerza con el hecho de que no hay diferencias significativas en el crecimiento longitudinal final entre las larvas de la dieta combinada y las larvas de la dieta orgánica.

Actualmente, el cultivo de insectos se enfoca en la generación de proteína, relegando el tratamiento de residuos. Sin embargo, se conoce que una dieta plástica no genera estrés oxidativo en las células de las larvas de coleópteros, e incluso, no afectaría la salud de los individuos, quienes incluso acumularían una mayor proporción de proteína en comparación con una dieta convencional (Zielińska et al., 2021). De confirmarse estas ideas, se amplían significativamente las posibilidades de subproductos y aprovechamiento de recursos en un modelo de economía circular y entomoremediación plástica.

La cantidad de frass recolectado luego del ensayo, fue similar entre la dieta orgánica y la dieta combinada, pero significativamente menor en el caso de la dieta inorgánica (Tabla 2, Figura 5). Esto es una respuesta a que las larvas no tienden a una inclinación natural a alimentarse de plástico.

Los trabajos de Bulak et al. (2018) y Yang et al. (2021) señalan que lo óptimo sería agregar aditivos a los tratamientos plásticos para estimular su consumo o inclinarse hacia dietas combinadas que incluya harinas. Una dieta basada totalmente en plástico no sería ideal para fomentar la entomoremediación de EPS, ya que las larvas no consumen el sustrato de manera voraz y no producen cantidades significativas de frass para revalorizar los residuos. Incluso, teniendo en cuenta que el crecimiento de las larvas es considerablemente más lento, el ciclo de vida se alargaría debido a la falta de nutrientes. Esto resultaría en un sistema ineficiente, con bajas posibilidades de reproducción de los insectos y, por lo tanto, tasas bajas de aumento de biomasa viva para procesar los residuos.

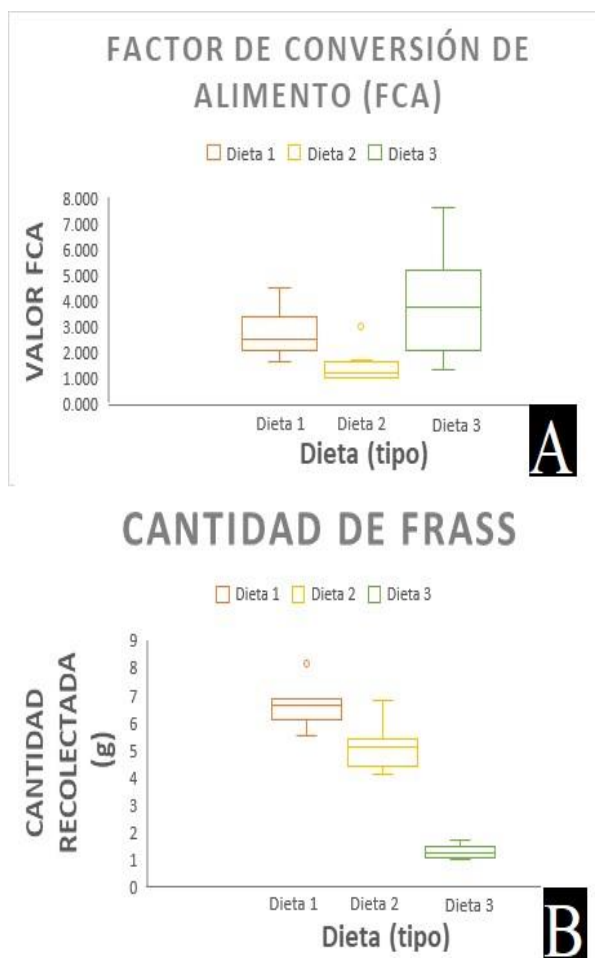
En relación con la cantidad de biomasa aprovechable, en todo tipo de granjas se interpreta la conversión de alimento como la unidad mínima de alimento que requieren los individuos para generar una unidad de cosecha (Cabezas, 2023). Se entiende que, a mayor cantidad de larvas, mayor capacidad de procesamiento de sustrato tiene el sistema.

En este sentido, los mejores valores de *FCA* se obtuvieron de la dieta combinada, que fue significativamente más eficaz que las otras dos dietas (ver Tabla 3). Con este hecho se explica de mejor manera, que las larvas criadas en una dieta combinada tienen mayor capacidad para alimentarse del sustrato, sobrevivir al tratamiento y generar el biofertilizante de interés.

**Tabla 2.** Datos de la cantidad de Frass recolectado por tratamiento

Dieta	Cantidad de Frass (g.)	
	Valor	<i>p</i>
Orgánica	6,63±0,76	
Combinada	5,11±0,83	
Inorgánica	1,28±0,23	< 0,05*

N/S: Diferencias no significantes con otras dietas. \* Diferencia significativa con las otras dos dietas



**Figura 5.** Representaciones gráficas de A: TCA para las tres dietas y, B: Cantidad de Frass recolectada en 6 meses de cada tratamiento.

**Tabla 3.** Datos del promedio de TCA para las tres dietas

Dieta	Valor de <i>FCA</i>	
	Valor	<i>p</i>
Orgánica	2,25±0,88	
Combinada	1,12±0,35	
Inorgánica	3,87±2,06	< 0,05*

\* Diferencia significativa entre la dieta 2 y dieta 3

#### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de larvas de *T. molitor* se ve afectado negativamente cuando el sustrato de crecimiento se basa únicamente en EPS. En estas condiciones, se observa una disminución en la tasa de supervivencia. Además, es evidente que la inclusión de plástico ya sea como combinación en la dieta o como sustrato único, conlleva una prolongación del tiempo de desarrollo larval. Aunque esta diferencia no resultó entre la dieta combinada con EPS y la dieta completamente orgánica.

Un sustrato totalmente inorgánico no demuestra éxito en el contexto de un sistema de entomoremediación. Esto se evidencia por la cantidad de frass que se extrajo de las repeticiones compuestas por EPS, que tuvo un valor significativamente menor que las otras dietas. Por ello, queda claro que las larvas no tienen un impulso natural para alimentarse exclusivamente de plástico, aun cuando sea el único recurso disponible.

Las dietas combinadas evidencian mejores valores de Factor de Conversión Alimento (*FCA*) y, por lo tanto, mayor cantidad de biomasa capaz de procesar los residuos plásticos sin comprender los niveles de supervivencia. La escasa biomasa generada junto con un procesamiento limitado de EPS por parte de las larvas resulta en una producción de frass poco efectiva, lo que a su vez hace que el sistema carezca de rentabilidad.

Es relevante recalcar que los restos generados de la masticación pueden tener tamaños minúsculos, incluso si no han pasado por el tracto digestivo de las larvas. Por esta razón, es probable que el frass final contenga fragmentos no procesados de alimento, ya sea sustrato orgánico o plástico. Sin embargo, en este estudio no es viable separar y cuantificar la cantidad de microplásticos formado. Por ello, es crucial ampliar la investigación en esta área para determinar la proporción de fragmentos inorgánicos presentes en el biofertilizante. Si existe una proporción significativa o ambientalmente peligrosa, se sugiere considerar vías de tratamiento complementario a para mejorar la calidad del producto final.

Es importante prolongar la investigación en este tema, de esta manera se puede determinar la proporción de fragmentos inorgánicos en el biofertilizante y, de existir un volumen importante del mismo se plantea proponer vías de tratamiento complementario para mejorar la calidad del producto final.

La estandarización de la dieta se plantea como una necesidad importante para futuras investigaciones, dado que las



características del frass pueden variar según la especie criada y la alimentación proporcionada a las larvas.

La interacción con variables ambientales como la temperatura, humedad, fotoperiodo, calidad y disponibilidad de alimento puede influir en el tiempo de vida y en la frecuencia de cambio de estadio de las larvas. Esta manipulación podría ser empleada para controlar el periodo durante el cual las larvas se mantienen en su estado larval y, por ende, mejorar el proceso de entomoremediación.

Es importante abordar de manera adecuada el manejo del frass resultante de este proceso de insecticultura. La gestión eficiente de los residuos se convierte en un factor esencial para fomentar un biocomercio responsable centrado en los insectos y, de esta forma, aprovechar los beneficios socioeconómicos y ambientales que puede brindar esta revalorización novedosa de residuos plásticos.

## REFERENCIAS

- An, R., Liu, C., Wang, J., y Jia, P. (2023). Recent Advances in Degradation of Polymer Plastics by Insects Inhabiting Microorganisms. *Polymers*, 15(5), 1307. <https://doi.org/10.3390/polym15051307>
- Arbab, A. (2019). Effect of temperature on pupal development in meal worm *Tenebrio molitor* L. *Indian Journal of Entomology*, 81(4), 640. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2019.00138.X>
- Arriola, E., y Velasquez, F. (2013). *Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)*. [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Red de repositorios Latinoamericanos repositorio de Obtenido de: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/161014>.
- Ayres, M., Ayres, J., Ayres, D., y Santos, A. (2007). *BioEstat Aplicacoes estatisticas nas áreas das ciencias biológicas and medical (5.0)*.
- Bataineh, K. M. (2020). Life-Cycle Assessment of Recycling Postconsumer High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/8905431>
- Blakstad, J. (2021). *The utilization of frass from the yellow mealworm (Tenebrio molitor) as a plant fertilizer and immune stimulant*. [Tesis de Maestría, Norwegian University of Science and Technology]. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2782494?locale-attribute=en>
- Božek, M., Hanus-Lorenz, B., y Rybak, J. (2017). The studies on waste biodegradation by *Tenebrio molitor*. *E3S Web of Conferences*, 17, 00011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171700011>
- Brandon, A., Gao, S., Tian, R., Ning, D., Yang, S., Zhou, J., Wu, W., y Criddle, C. (2018). Biodegradation of Polyethylene and Plastic Mixtures in Mealworms (Larvae of *Tenebrio molitor*) and Effects on the Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6526–6533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02301>
- Bulak, P., Polakowski, C., Nowak, K., Waško, A., Wiącek, D., & Bieganski, A. (2018). *Hermetia illucens* as a new and promising species for use in entomoremediation. *Science of The Total Environment*, 633, 912–919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.252>
- Cabezas, G. (2023). *Suplementación con microorganismos eficientes sobre algunos parámetros productivos en pollos Cobb 500*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1251>
- Cella, R., Mumbach, G., Andrade, K., Oliveira, P., Marangoni, C., Bolzan, A., Bernard, S., y Machado, R. (2018). Polystyrene recycling processes by dissolution in ethyl acetate. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(18). <https://doi.org/10.1002/app.46208>
- Chen, Y., Awasthi, A. K., Wei, F., Tan, Q., y Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. In *Science of the Total Environment* (Vol. 752). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- Gan, S., Phua, S., Yeo, J., Heng, Z., y Xing, Z. (2021). Method for Zero-Waste Circular Economy Using Worms for Plastic Agriculture: Augmenting Polystyrene Consumption and Plant Growth. *Methods and Protocols*, 4(2), 43. <https://doi.org/10.3390/mps4020043>
- Gärtling, D., Kirchner, S., y Schulz, H. (2020). Assessment of the N- and P-Fertilization Effect of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) By-Products on Maize. *Journal of Insect Science*, 20(5). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaa089>
- Grau, T., Vilcinkas, A., y Joop, G. (2017). Sustainable farming of the mealworm *Tenebrio molitor* for the production of food and feed. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 72(9–10), 337–349. <https://doi.org/10.1515/znc-2017-0033>
- Haque, Md. S. (2019). Sustainable use of plastic brick from waste PET plastic bottle as building block in Rohingya refugee camp: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 36163–36183. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06843-y>
- IPIFF: Plataforma Internacional de Alimentos de Insecto. (2022). *Guide on Good Hygiene Practices. Chapter 1-*

- Food and feed safety management systems: general principles and EU requirements.* <https://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/12/IPIFF-Guide-on-Good-Hygiene-Practices.pdf>(Julio, 2023)
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., y Wang, Z. (2021). Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers*, 13(20), 3539. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>
- Lebreton, L., y Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P., y Xing, D. (2020). Biodegradation of Polyethylene and Polystyrene by Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella* L.) and the Effect of Co-diet Supplementation on the Core Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 54(5), 2821–2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
- Lou, Y., Li, Y., Lu, B., Liu, Q., Yang, S., Liu, B., Ren, N., Wu, W., y Xing, D. (2021). Response of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut microbiome to diet shifts during polystyrene and polyethylene biodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, (416). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126222>
- Mirzaeva, D. A., Khujamshukurov, N. A., Zokirov, B., Soxibov, B. O., y Kuchkarova, D. (2020). Influence of Temperature and Humidity on the Development of *Tenebrio molitor* L. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 3544–3559. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.422>
- Mondragón, I. (2021). Dimorfismo sexual de *Zophobas morio* (Fabricius, 1776) (Coleoptera, Tenebrionidae) en las etapas de pupa y de adulto. *Ingeniería y Región*, 25, 22–31. <https://doi.org/10.25054/22161325.2703>
- Official Journal of the European Union (2021). *Amending certain Annexes to Regulation (EU) No 142/2011 as regards the requirements for placing on the market of certain insect products and the adaptation of a containment method* (L. No. 142/2011). <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC109216/>
- Ooninx, D., van Broekhoven, S., van Huis, A., y van Loon, J. J. A. (2019). Correction: Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PLOS ONE*, 14(10), artículo e0222043. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222043>
- Patrício, A., Prata, J., Walker, T., Campos, D., Duarte, A., Soares, A., Barcelò, D., y Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of The Total Environment*, 742, 140565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>
- Poveda, J. (2021). Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Ramli, N. H., Mustapa, S., y Abdul, M. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 47529. <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- Solíz, M. (2015). Ecología política y geografía crítica de la basura en el Ecuador. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 17. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1259>
- Sun, J., Prabhu, A., Aroney, S., y Rinke, C. (2022). Insights into plastic biodegradation: community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials. *Microbial Genomics*, 8(6). <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000842>
- Tan, K., Mohd, N., Mohd A., Razak, A., y Kamarudin, K. (2021). Isolation and identification of polystyrene degrading bacteria from *Zophobas morio*'s gut. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(8). <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9118>
- Truman, J., y Riddiford, L. (2019). The evolution of insect metamorphosis: a developmental and endocrine view. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1783), 20190070. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0070>
- van Huis, A., van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., y Vantomme, P. (2013). *Edible insects: future prospects for food and feed security* Roma, Italia. FAO. <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- Yang, L., Gao, J., Liu, Y., Zhuang, G., Peng, X., Wu, W., y Zhuang, X. (2021). Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence. *Chemosphere*, 262, 127818. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127818>
- Yang, S., Brandon, A., Andrew Flanagan, J., Yang, J., Ning, D., Cai, S., Fan, H., Wang, Z., Ren, J., Benbow, E., Ren, N., Waymouth, R., Zhou, J., Criddle, C., y Wu, W. (2018). Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of

polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 191, 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.117>

Yang, X., Wen, P., Yang, Y., Jia, P., Li, W., y Pei, D. (2023). Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1001750>

Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., yJiang, L. (2015). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science and Technology*, 49(20), 12080–12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>

Zielińska, E., Zieliński, D., Jakubczyk, A., Karaś, M., Pankiewicz, U., Flasz, B., Dziewięcka, M., y Lewicki, S. (2021). The impact of polystyrene consumption by edible insects *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* on their nutritional value, cytotoxicity, and oxidative stress parameters. *Food Chemistry*, 345, 128846. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128846>

## BIOGRAFÍA



**Daniela, Bastidas Proaño**, es Licenciada en Ciencias Biológicas y Ambientales, graduada de la Universidad Central del Ecuador en 2020. Obtuvo su Maestría en Gestión Ambiental en la Universidad Internacional Iberoamericana de México en 2023. Durante su carrera,

completó pasantías en INABIO y ha acumulado experiencia en laboratorios especializados en entomología, biología molecular y de reproducción asistida. Además de ser coautora de artículos científicos de endocrinología. Actualmente su principal enfoque es la gestión de residuos a través del enfoque entomológico y la promoción de la economía circular mediante la insecticultura



# Improvement of the Mechanical Properties of Structural Concrete Using Microporous Ethylene Vinyl Acetate

Chaname, Josef<sup>1</sup> ; García, Juan<sup>1\*</sup> ; Arriola, Guillermo<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Jaén, Departamento Académico de Ingeniería Civil, Jaén, Perú

**Abstract:** Over the years, the world has tried to increase the recycling of materials, especially those of artificial origin, this in order to produce compounds that are sustainable and sustainable. Among these materials, concrete stands out as a versatile element, to which different external agents can be added; however, since many of them are not compatible with aggregates, cement or water, can cause some alterations in their mechanical performance. Therefore, the present investigation addressed the study of an artificial material called Microporous Ethylene Vinyl Acetate (MEVA), in order to evaluate its influence on the mechanical properties of structural concrete. MEVA additions were used in ranges of 5.00 %, 10.00 %, 15.00 % and 20.00 % with respect to the volume of concrete, to analyze its behavior in the mix, both in physical and mechanical properties. The results show that the workability and unit weight are affected by the increase in MEVA. Despite this, the mechanical performance showed significant increases in the compressive strength of 8.81 %, tensile of 22.86 %, flexion of 24.51 % and modulus of elasticity of 2.12 %, with the addition of 5.00 % of MEVA after 28 days. Nevertheless, at higher doses there is a reduction in said strengths. For these reasons, it is concluded that the incorporation of MEVA at 5.00 % greatly improves the mechanical properties of concrete for structural use, in relation to the theoretical design strength of 21.00 MPa.

**Keywords:** Cement; concrete; unit weight; compressive strength; workability

## Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas del Concreto Estructural Utilizando Microporoso Etileno Acetato de Vinilo

**Resumen:** A través del paso de los años, en todo el mundo se ha tratado de incrementar el reciclaje de materiales, sobre todo los de origen artificial, esto con la finalidad de producir compuestos que se sean sostenibles. Dentro de estos materiales destaca el concreto como un elemento versátil, al que se le puede añadir diferentes agentes externos; sin embargo, muchos de ellos al no ser compatibles con los agregados, el cemento o el agua, pueden provocar algunas alteraciones en su desempeño mecánico. Por lo expuesto, la presente investigación abordó el estudio de un material artificial llamado Microporoso Etileno Acetato de Vinilo (MEVA), con el fin de evaluar su influencia en las propiedades mecánicas del concreto estructural. Se utilizaron adiciones de MEVA en rangos de 5.00 %, 10.00 %, 15.00 % y 20.00 % respecto al volumen del concreto, para analizar su comportamiento en la mezcla, tanto en las propiedades físicas y mecánicas. Los resultados muestran que la trabajabilidad y peso unitario se ven afectadas ante el aumento de MEVA. A pesar de ello, el desempeño mecánico mostró significativos incrementos en la resistencia a la compresión en 8.81 %, tracción en 22.86 %, flexión en 24.51 % y módulo de elasticidad en 2.12 %, con la adición al 5.00 % de MEVA a los 28 días. No obstante, a mayores dosis existe una reducción de dichas resistencias. Por lo expuesto, se concluye en que la incorporación de MEVA en 5.00 % mejora en gran media las propiedades mecánicas del concreto para uso estructural, en relación a la resistencia teórica de diseño de 21.00 MPa.

**Palabras clave:** Cemento; concreto; peso unitario; resistencia a la compresión; trabajabilidad

### 1. INTRODUCTION

Structures are always exposed to constant loads and deformations, as structural concrete is widely used around the world and is always prone to it. On the other hand, what is

sought is a material other than cement, aggregates or additives that accompanies the concrete mix (Lee et al., 2019; Muñoz et al., 2023); in order to lighten its weight and at the same time equal or significantly improve the main mechanical properties (Chicoma et al., 2023; Xiong et al., 2019). As indicated above,

\*gchumacerojuanm@uss.edu.pe

Recibido: 16/08/2023

Aceptado: 15/01/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/rp.vol53n2.02

CC 4.0

there are various studies on the incorporation of materials from different origins, especially those from artificial compounds, since these can be recycled and reused (Gregorova et al., 2017); to be incorporated into the different elements that are used in the various civil works, especially for the sustainable production of concrete (De Brito & Kurda, 2020). Among these materials that can be added to the concrete mix, the Microporous Ethylene Vinyl Acetate (MEVA) stands out, since it is a residual waste input and at the same time polluting, but it can be reused and recycled (Liu et al., 2019); in this regard, recent research has shown that the MEVA has important properties that can provide favorable conditions for concrete in its hardened state (Ismail et al., 2016); especially in the significant increase in compressive and flexural strength (Ghally et al., 2022; Khan et al., 2019; Shang et al., 2023).

The MEVA is a very popular input used as footwear or insulation material, educational games, among other industries (Kulesza et al., 2020); likewise, this type of material is not biodegradable, resulting in large volumes of waste, which generates a great negative impact on the environment (Zhang et al., 2018). Among the important characteristics of this material, its density stands out, since it is very light and varies from 12.00 to 80.00 kg/m<sup>3</sup> (Machado et al., 2019; Parra et al., 2019). In addition, it is a material that has gained great popularity in the construction industry (Marques et al., 2019), so today its use in this area is gradually increasing, especially for the production of normal and lightweight concrete (Ioana et al., 2023; Ngassam et al., 2018); including partial replacement of aggregates (Selvakumar et al., 2022); also, to establish lightweight and ultralight concrete (Serelis & Vaitkevicius, 2022; Sldozian et al., 2023); similarly, for the production of lightweight concrete blocks (Carneiro et al., 2020) and even to reduce noise, using lightweight concrete for subfloors (Pacheco et al., 2017).

On the contrary, it has been shown that the workability of concrete in the fresh state increases gradually with the use of MEVA, in relation to the doses of 5.00 %, 10.00 %, 15.00 % and 20.00 % with respect to the weight of the cement (Swarnkar & Srivastava, 2021); likewise, the settlement test shows a slight increase, as a result of the substitution of gravel in 10.00 % to 30.00 % by MEVA residues in the concrete mix, however, its unit weight is decreased as the doses of this input (Machado et al., 2019); parallel to these findings, it has been determined that the unit weight tends to be reduced by up to 22.00 % with additions of MEVA in millimeter size (Baptista et al., 2021).

Regarding the mechanical properties of concrete with MEVA inclusions, Gregorová et al. (2020) describe that the compressive strength with 75.00 % of MEVA residues did not have a significant influence, but the initial qualities of normal concrete are maintained. Despite these results Moreira et al. (2020) managed to obtain a considerable increase with 6.00 % of MEVA, in the compressive strength of up to 54.00 % and in the flexural strength it increased up to 59.00 % in relation to the standard concrete; however Khan et al. (2019) and Ahmad et al. (2022) recommend incorporations of MEVA up to a maximum of 16.00 %; although in the complementary study of Ghally et al. (2022) obtained that with 20.00 % of MEVA

added to the concrete, a compressive strength of 100.00 MPa can be achieved, that is, almost double the required strength, while in the flexural strength and tensile strength obtained nearly triple the standard strength.

Almost all the findings shown in the available literature on the inclusion of MEVA in concrete generally consider a predominant size of this residue of up to 5.00 mm and the standard strength in many cases is not applicable for structural concrete. Due to this the importance arises of its study for greater ranges of strength, added to this. In Peru, there are no related studies on this material with application in concrete of structural type, since at a general level this material has been studied for lightweight concrete, for the conformation of bricks and to stabilize soils of low bearing capacity, that is why the importance of addressing their study arises.

The main objective of this research was to evaluate the influence of MEVA in the improvement of the mechanical properties of structural concrete, using for this purpose additions of MEVA in ranges of 5.00 %, 10.00 %, 15.00 % and 20.00 % with respect to the volume of concrete, to later analyze its behavior in the mixture, both in the physical properties (slump and unit weight), and in the mechanical properties (compression strength, flexural strength, tensile strength and modulus of elasticity).

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Materials

#### 2.1.1 Portland cement

The present investigation used type I Portland cement that complied with ASTM specifications (ASTM C150, 2022). The density obtained was 3.15 gr/cm<sup>3</sup>, likewise, the chemical and physical characteristics of the cement used are shown in Table 1.

**Table 1.** Portland cement characteristics

Property Type	Element	Unit	Obtained value	Specification requirement according to ASTM C150
Chemistry	Amount of MgO	%	2.10	6.00 maximum
	Amount of SO <sub>3</sub>	%	2.80	3.00 maximum
	Loss on ignition	%	3.10	3.50 maximum
	Insoluble residue	%	0.60	1.50 maximum
Physical	Volume air content	%	8.00	12.00 maximum
	Specific surface	cm <sup>2</sup> /g	4,000.00	2,600.00 maximum
	Density	g/cm <sup>3</sup>	3.15	Not specific
	Expansion	%	0.07	0.80 maximum

#### 2.1.2 Aggregates

The natural aggregates were obtained from the Lambayeque Region of Peru and were characterized according to the ASTM international standard (ASTM C136, 2020). The fine

aggregate was sieved showing an optimal gradation, where a fineness modulus of 3.16 was obtained, while for the coarse aggregate a nominal maximum size of 19.05 mm was determined. The complementary parameters obtained for the aggregates are shown in Table 2.

### 2.1.3 Microporous Ethylene Vinyl Acetate (MEVA)

The MEVA residues were collected through a direct recycling process from some shoe insole industries in the Lambayeque Region of Peru, then the MEVA was processed in a rotary blade mill in order to obtain pieces smaller than 3/8" (9.52 mm), later it was sieved to identify its granulometric composition (Figure 1) and finally some physical properties were established through the respective laboratory tests (Table 3).

**Table 2.** Characteristics of the aggregates used

Parameter	Unit	Value obtained according to type of aggregate	
		Fine aggregate	Coarse aggregate
Specific gravity	-	2.46	2.70
Water absorption	%	0.92	0.27
Water content	%	0.72	0.85
Dry unit weight	kg/m <sup>3</sup>	1,540.00	1,442.00
Compacted unit weight	kg/m <sup>3</sup>	1,756.00	1,599.00
Abrasion	%	-	11.48



**Figure 1.** MEVA size distribution

**Table 3.** Physical properties of MEVA

Parameter	Unit	Value obtained
Texture	-	Microporous
Size	mm	9.50
Specific gravity	-	0.26
Absorption	%	10.00
Dry unit weight	kg/m <sup>3</sup>	93.00
Compacted unit weight	kg/m <sup>3</sup>	99.00

## 2.2 Methodology

The methodology used in this research was experimental, for which several laboratory tests were carried out in order to obtain the required strength parameters and subsequently compare all the MEVA additions in the concrete in relation to the standard strength.

In the initial stage, the natural aggregates and MEVA in its different percentages were mixed in a dry state for about 5 minutes, then cement and water were added to mix them until a combination of the materials was achieved, as the doses of MEVA increased, a segregation of the natural aggregates was observed. It did not have a special elaboration process; it is very similar to a conventional structural concrete mixing process.

Subsequently, the fresh concrete was placed in cylindrical molds with dimensions of 15 cm in diameter and 30 cm in height and prismatic molds of 15 cm in width, 15 cm in height and 55 cm in length, rodded at 25 strokes every 3 layers with a metal rod with a rounded tip. After 24 hours of pouring and setting of the concrete, the specimens were demolded to cure at room temperature by complete immersion in potable water until the day of testing at 7, 14 and 28 days. The number of specimens per test was 45 units (compressive strength), 45 units (tensile strength), 45 units (flexural strength) and 45 units (modulus of elasticity), for a total of 180 specimens. It should be noted that all these conditions and procedures were supervised in the laboratory. Figure 2 shows the hardened samples in cylindrical and prismatic form.

The strength was selected for a structural concrete with a control design of 21.00 MPa labeled as M1 with a water/cement (w/c) ratio of 0.65, according to the American guidelines ACI 211.1. Meanwhile, concrete samples containing MEVA at percentages of 5.00 %, 10.00 %, 15.00 %, and 20.00 % were labeled as M2, M3, M4, and M5, respectively. The final proportions are shown in Table 4, indicating in each case the respective amounts used.

**Table 4.** Dosages of used mixtures

Parameter	Unit	MEVA samples and their respective percentages				
		M1 with 0.00 %	M2 with 5.00 %	M3 with 10.00 %	M4 with 15.00 %	M5 with 20.00 %
Cement	kg/m <sup>3</sup>	394.00	386.00	384.00	368.00	354.00
Water	Lts	257.00	252.00	251.00	240.00	231.00
Fine aggregate	kg/m <sup>3</sup>	805.00	777.00	771.00	732.00	688.00
Coarse aggregate	kg/m <sup>3</sup>	876.00	851.00	846.00	806.00	766.00
MEVA	kg/m <sup>3</sup>	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20



**Figure 2.** Mode of failure of cylinders and beams after breakage

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Physical properties

### 3.1.1 Slump

The slump was evaluated according to the ASTM C143 (2020) standard, finding as results a significant decrease in this parameter as the MEVA proportions increase (Figure 3a). For the standard concrete (sample M1) the range was 9.20 cm, while for the addition of 20 % of MEVA (sample M5) it reached 5.90 cm, that is, it decreased by 35.87 %. This reaction could be explained by the fact that by increasing the amount of MEVA, the water absorption also increases, finally showing a loss of workability in the concrete during the fresh state. These findings were similar to those established by Carneiro et al. (2020), Farhoud et al. (2019) and Khan et al. (2018), and since they determined similar ranges of slump reduction.

### 3.1.2 Unit weight

The unit weight was evaluated following the requirements of the ASTM C138 (2017) standard, subsequently the findings reached indicate that by increasing the amount of MEVA in the concrete, the unit weight can be greatly reduced (Figure 3b). As a consequence of this, the reduction varied from 0.99 % (sample M2) to 10.36 % (sample M5), in both cases with respect to the standard concrete. From what has been indicated, it can be deduced that the MEVA is displacing both the aggregate and the cement particles, whose unit weights are totally different and due to their combination in the concrete mix, this decrease occurs progressively, similar to what happened in the slump. In this context, similar studies such as the one by Dulsang et al. (2016) obtained a maximum decrease in unit weight of 66.00 % for 10.00 % addition of MEVA; on the other hand, Machado et al. (2019) managed to reduce the unit weight by 10.00 % with 30.00 % of MEVA and Farhud et al. (2019) determined maximum decreases around 36.00 % for 20.00 % of MEVA. In this sense, a maximum range of 5.00 % of MEVA is acceptable to keep the physical properties of the concrete homogeneous and therefore not directly affect the workability in the fresh state.

## 3.2 Mechanical properties

### 3.2.1 Compressive strength

The results of the compressive strength followed the provisions of the ASTM C39 (2021) standard. Subsequently, as part of the findings, a progressive decrease in this strength was obtained, especially from sample M3 to sample M5 (Figure 3c), since they did not meet the required strength at 28 days. The strength reached by the standard concrete corresponding to sample M1 with 0.00 % of MEVA reached 23.63 MPa, while sample M2 with 5.00 % of MEVA achieved a strength of 22.85 MPa, that is, it suffered a decrease of 3.30 %, but it complied with the strength compressive of design for structural concrete, as demonstrated by Farhoud et al. (2019) and Azadmanesh et al. (2021) in their respective investigations, since they indicate that up to 5.00 % incorporation of MEVA is the adequate. In this regard, for the present investigation, the value of 5.00 % of MEVA added to the concrete was optimal for the compressive strength, since said addition exceeded the strength required for structural concrete by 8.81 %.

Regarding the effect of reducing can be explained by the fact that the density of MEVA is lower than that of the aggregates, which produces a certain lightness to the concrete in its hardened state. Similar studies such as those by Dulsang et al. (2016) and Zhang et al. (2018), determined that the compressive strength for 3.00 % of MEVA was the only dose that equaled the standard strength; while Machado et al. (2019) and Marques et al. (2019) found that the MEVA values above to 10.00 % fail to match the initial standard compressive strength, so they recommend using lower doses.

### 3.2.2 Tensile strength

The results of the tensile strength were evaluated in relation to the ASTM C496 (2017) standard, whose findings are shown in Figure 3d. In all cases, decreases in tensile strength compared to standard concrete at 28 days were determined, where the minimum reduction was 4.80 % (sample M2) and the maximum reduction was 40.59 % (sample M5). However, when evaluated based on the minimum design tensile strength of 2.10 MPa, an increase of 22.86 % was obtained for sample M2 whose addition was 5.00 % of MEVA and an increase of 7.61 % for the M3 sample for an incorporation of 10.00 % of MEVA, for the other cases the strengths were lower.

From the foregoing, it can be deduced that the reaction produced in both tensile and compressive strength is attributed to the displacement of the granular material given by the MEVA, resulting a progressive decrease in both strengths, as well as in the density of the concrete, as the MEVA doses increase. This is demonstrated in their respective studies by Khan et al. (2019) and Moreira et al. (2020).

### 3.2.3 Flexural strength

The flexural strength was analyzed considering the ASTM C78 (2022) standard, whose findings are indicated in Figure 3e. In all the cases studied, the results denote a reduction in flexural strength in relation to standard concrete (sample M1), however, when evaluated in reference to the minimum design strength of 3.55 MPa, a significant increase is evident in all samples, with the maximum increase being 24.51 %, which corresponded to sample M2 for 5.00 % of MEVA.

On the other hand, there is evidence that the size variability of MEVA residues show little or no difference in the alteration of flexural strength, but the amounts added to the concrete do have an influence, as pointed out by Farhoud et al. (2019) and Khan et al. (2019). Likewise, the decreases produced in the present investigation are explained due to the fact that all the properties analyzed maintain the same pattern of reduction both in the compressive strength, tensile strength and flexural strength with respect to the control sample, whose main determining factor is the effect produced by the increase in the dose of MEVA on the density of concrete and therefore on the mechanical properties in its hardened state.

### 3.2.4 Modulus of elasticity

The modulus of elasticity was evaluated in accordance with the ASTM C469 (2022) standard, the results of which are



shown in Figure 3f. The findings indicate that, like the other mechanical properties previously analyzed, there is also a considerable influence of MEVA on the modulus of elasticity of concrete in its hardened state, especially for the MEVA percentage of 20.00 %, since the modulus reached by sample M5 decreased by 31.66 % compared to the modulus of standard concrete (sample M1). Despite this, the M2 sample complied with the modulus requested for structural concrete, since its value reached 21.77 GPa, that is, it increased by 2.11 % in relation to the required modulus of elasticity of 21.32 GPa.

Figure 4 shows the unit stress-strain curves of the concrete obtained from the modulus of elasticity at the age of 28 days, in effect it is the product of the readings of 3 specimens for each experimental treatment; in addition, the graphs of their final averages for each treatment were developed as shown in Figure 4f.

### 3.3 Statistical analysis

The statistical analysis was based on the evaluation of the four mechanical properties of concrete considered in the present investigation, as shown in Figure 5a (compressive strength), Figure 5b (tensile strength), Figure 5c (flexural strength) and Figure 5d (modulus of elasticity).

As indicated in Figure 5a, a p-value of significance associated with the one-way Anova test for compressive strength was obtained, a value less than 0.05 ( $p = 2.5 \times 10^{-7} < 0.05$ ). So it can be affirmed that there is a significant difference between the effects of the treatment without any addition of MEVA (sample M1), compared to concrete with 5.00 % of MEVA inclusion (sample M2).

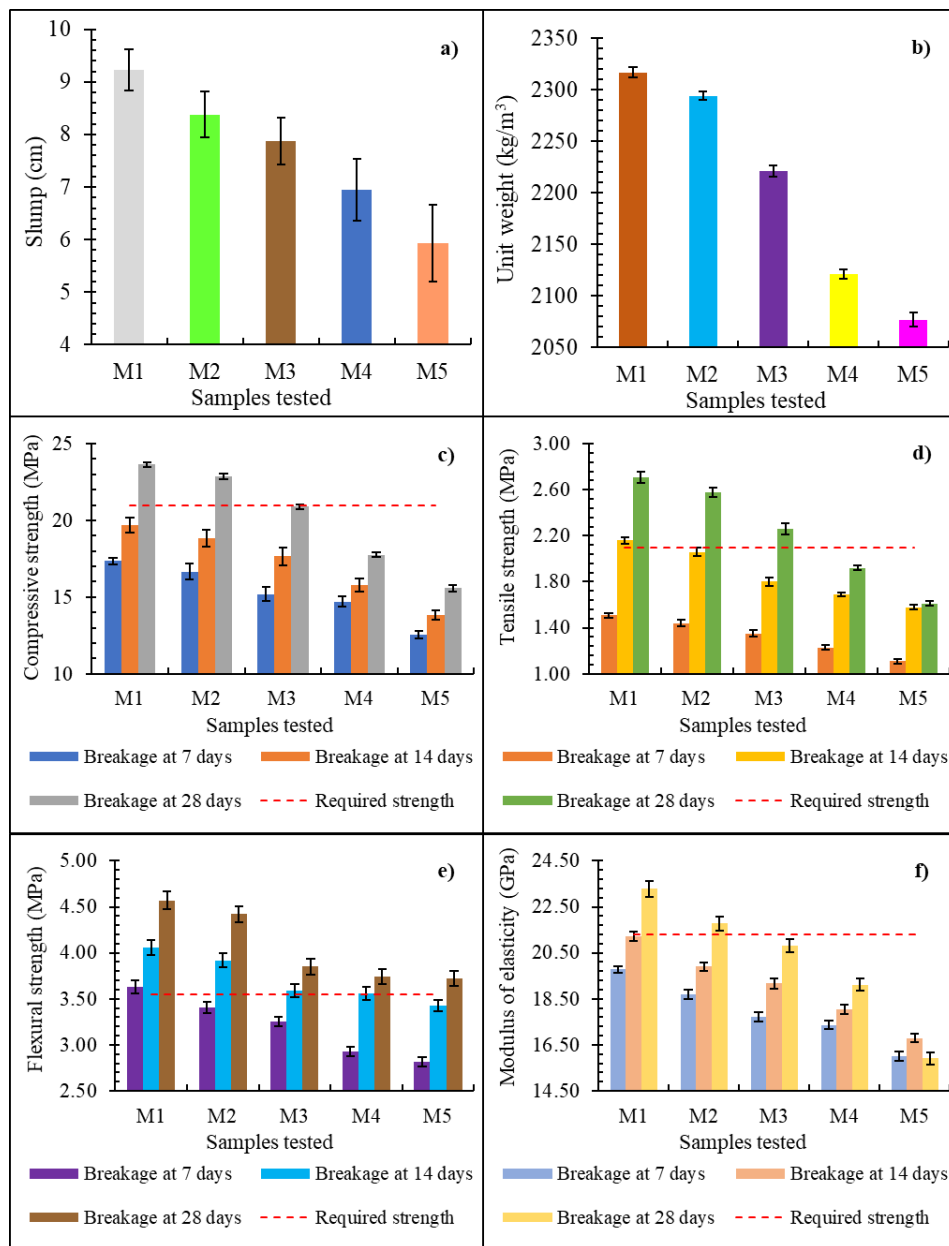
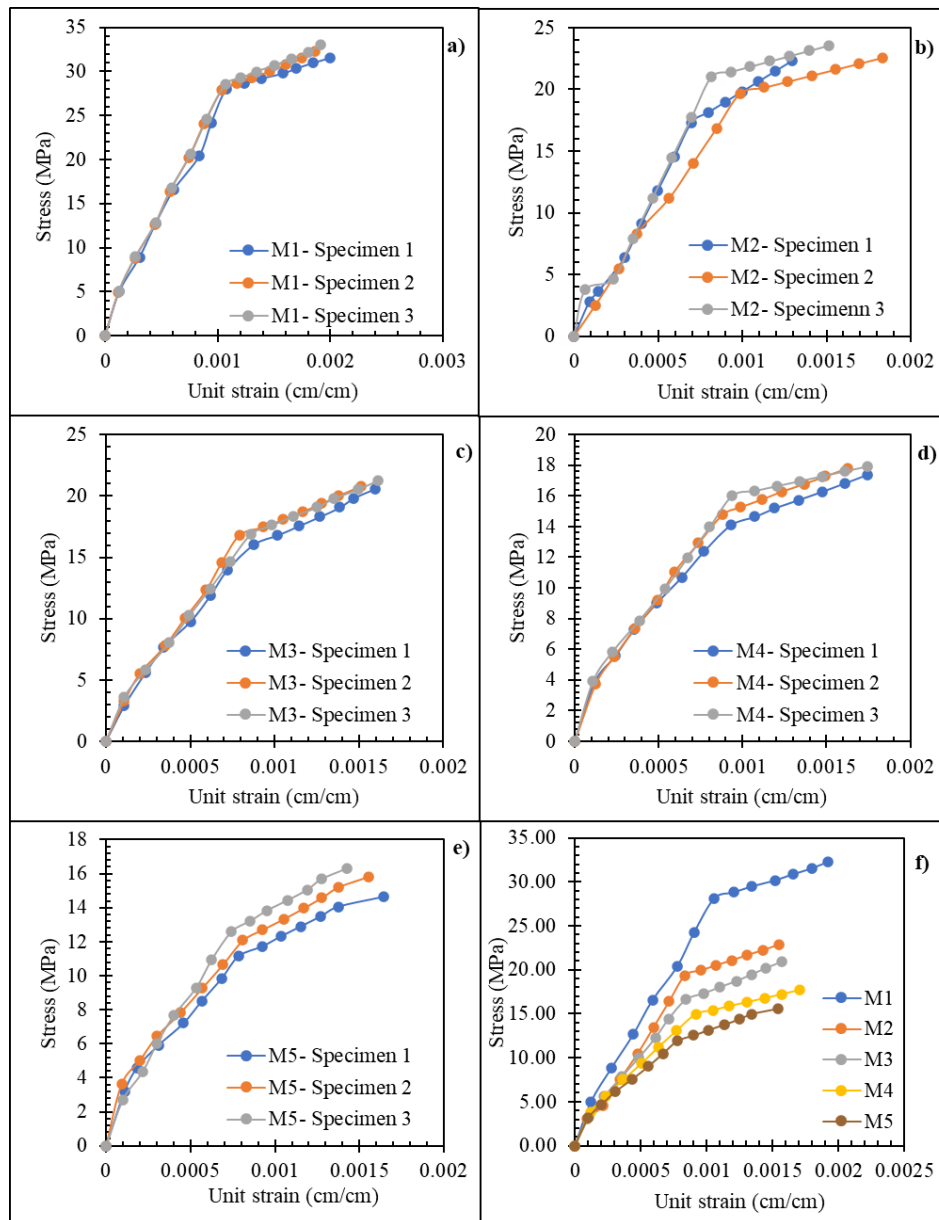


Figure 3. Physical properties of concrete: a) slump; b) unit weight; and mechanical properties of concrete: c) compressive strength; d) tensile strength; e) flexural strength and f) modulus of elasticity



**Figure 4.** Unit stress-strain curves of the mixtures: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; e) M5 and f) Average of stress-strain curves obtained

Both treatments made it possible to maximize this strength, which was identified by Tukey's multiple comparison test, establishing that the compressive strength achieved with 5.00 % of MEVA in the concrete was better than the other doses, but not being superior to the concrete strength without any incorporation of MEVA.

Also, in Figure 5b, corresponding to tensile strength, the one-way Anova test was applied, which presented a p-value of significance less than 0.05 ( $p = 1.16 \times 10^{-4} < 0.05$ ), that allowed us to know that there is a significant difference between the effects of these strength. In addition, Tukey's multiple comparison test made it possible to identify the optimal dose of MEVA in the concrete in relation to the strength without including MEVA, since statistically, the tensile strength with 5.00 % of MEVA in the concrete (sample M2) was better in relation to the other percentages, but not higher than the standard concrete (sample M1).

Then in Figure 5c, corresponding to the flexural strength, the p-value of significance of one-way Anova test, exhibited a value less than 0.05 ( $p = 2.3 \times 10^{-4} < 0.05$ ), that is, the effects of the MEVA incorporations presented significant differences. Likewise, these findings are supported by Tukey's multiple comparison test, since the concrete without any addition of MEVA (sample M1) was slightly higher than the concrete with MEVA at 5.00 % (sample M2).

Finally, in Figure 5d, corresponding to the modulus of elasticity, the one-factor Anova test presented a p-value less than 0.05 ( $p = 2.3 \times 10^{-8} < 0.05$ ), therefore the equality hypothesis is rejected, while Tukey's multiple comparisons test allowed us to identify that sample M1, corresponding to concrete without any addition of MEVA, had a significantly higher modulus of elasticity than concrete with 5.00 % of MEVA.

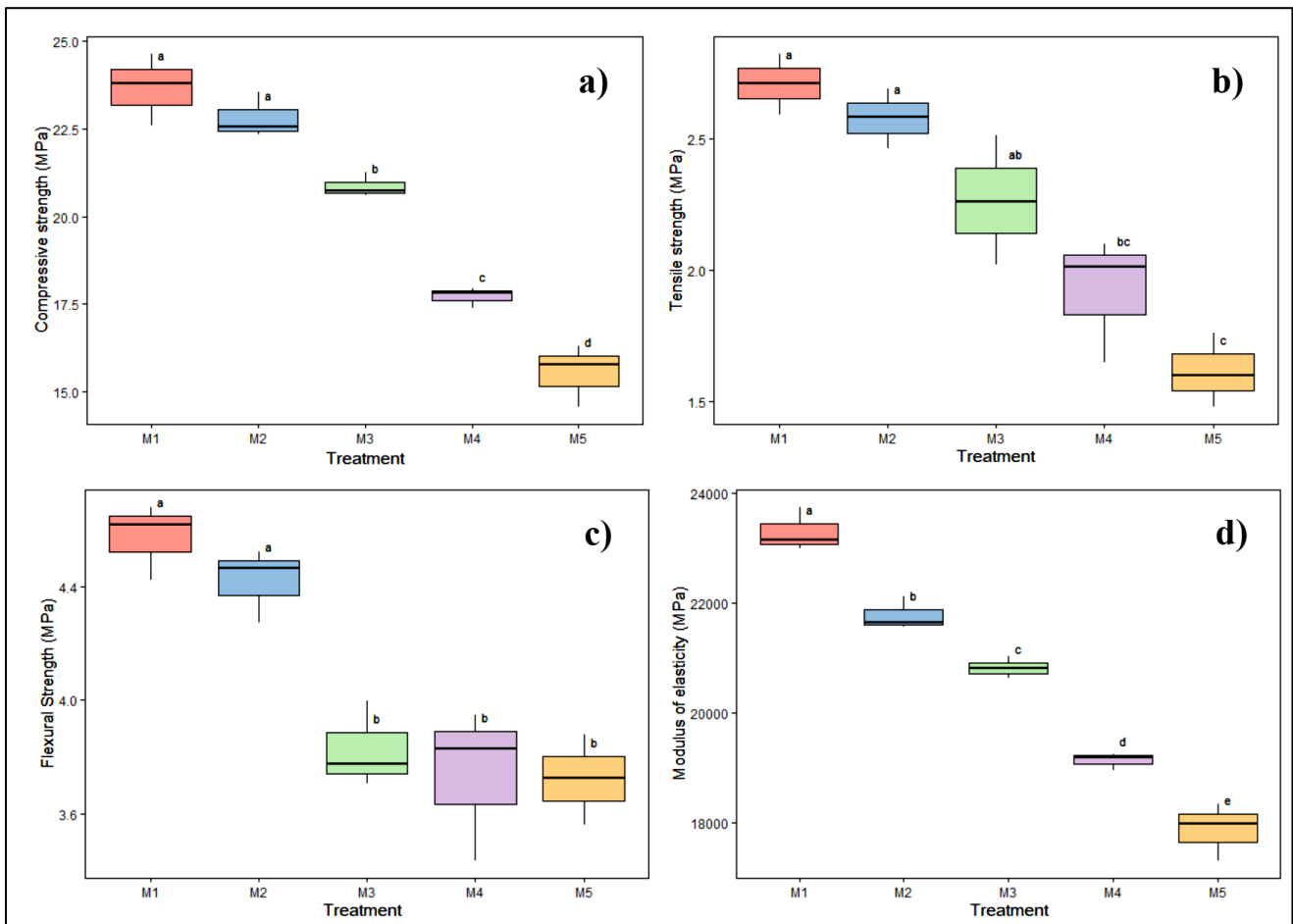


Figure 5. Box diagram corresponding to the evaluation of the mechanical properties of concrete: a) compressive strength; b) tensile strength; c) flexural strength; d) modulus of elasticity

#### 4. CONCLUSIONS

This document presents important experimental findings of an applied type of research, which demonstrates the great potential of using MEVA residues from the footwear industry to produce structural concrete. Based on this, the following conclusions can be extracted:

The decrease in the settlement and the unit weight of the concrete mixture during its fresh state, were affected mainly with doses higher than 10.00 % of MEVA, so an acceptable option to help improve these conditions would be using some additive of the plasticizer type. since it would be possible to greatly reduce the variation of the water and therefore the w/c ratio.

It was possible to establish that there is a gradual decrease in all the mechanical properties of concrete, as the doses of MEVA are increased. Despite this, the mechanical performance showed significant increases in the compressive strength with 8.81 %, in the tensile strength with 22.86 %, in the flexural strength with 24.51 %, and in the modulus of elasticity with 2.11 %, using the addition of 5.00 % of MEVA, compared to the strength required of 21.00 MPa at 28 days, for the above, said incorporation is the optimal and can be used in the elaboration of a structural concrete, likewise, these results were demonstrated by means of the respective statistical.

It is recommended for future studies the use of pozzolanic materials as an addition or replacement of aggregates in order to improve the integral behavior of structural concrete with MEVA, it is also necessary to investigate the internal microstructure and durability of concrete under these conditions, in order to guarantee the safety and functionality to produce concrete of this category.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Professional School of Civil Engineering of the Faculty of Engineering, Architecture and Urbanism of the Lord of Sipan University and the laboratory LEMS W&C E.I.R.L. for the facilities provided during the experimental tests.

#### REFERENCES

- Ahmad, I., Khan, K. A., Ahmad, T., Alam, M., & Bashir, M. T. (2022). Influence of accelerated curing on the compressive strength of polymer-modified concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(5), 589-599. <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0789-1>
- ASTM C39 (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0039\\_C0039M-21](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21)

- ASTM C78 (2022). Standard Test Method for Flexural strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0078\\_C0078M-22](https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22)
- ASTM C136 (2020). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19)
- ASTM C138 (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0138\\_C0138M-17A](https://doi.org/10.1520/C0138_C0138M-17A)
- ASTM C143 (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0143\\_C0143M-20](https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20)
- ASTM C150 (2022). Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(1). [https://doi.org/10.1520/C0150\\_C0150M-22](https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-22)
- ASTM C469 (2022). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0469\\_C0469M-22](https://doi.org/10.1520/C0469_C0469M-22)
- ASTM C496 (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 4(2). [https://doi.org/10.1520/C0496\\_C0496M-17](https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17)
- Azadmanesh, H., Hashemi, S., & Ghasemi, S. (2021). The effect of styrene-butadiene rubber and ethylene vinyl acetate polymers on the mechanical properties of engineered cementitious composites. *Composites Communications*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100656>
- Baptista, M., Da Luz Garcia, M., Pinho, S., Lopes, M., Almeida, M., Coelho, C., & Fonseca, C. (2021). Valorization of EVA waste from footwear industry as natural aggregates substitutes in mortar: The effect of granulometry. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(4), 1445-1455. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01222-7>
- Carneiro, F., Moreira, K., Sampaio, A., & Espinosa, R. (2020). Incorporation of vinyl ethylene acetate residue into the production of interlocking concrete blocks for paving. *Revista Materia*, 25(4), 1-11. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1155>
- Chicoma, A., Quiroz, R., Muñoz, S., & Villena, L. (2023). Influence of the physical and mechanical properties of concrete by adding rubber powder and silica fume. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 32(1), 205-223. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.32.1.31964>
- De Brito, J., & Kurda, R. (2020). Special issue low binder concrete and mortars. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/app10113866>
- Dulsang, N., Kasemsiri, P., Posi, P., Hiziroglu, S., & Chindaprasirt, P. (2016). Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. *Materials and Design*, 96, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.037>
- Farhoud, A., Mansour, M., Shoukry, R., El Bagoury, O., El Akkad, S., Farag, M., Hamza, A., El Nahas, E., Hussam, A., & Aboud-Zeid, M. (2019). Use of EVA foam in Portland cement concrete. *7th International Materials Specialty Conference 2018, Held as Part of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2018*, 415-426. Retrieved from SCOPUS
- Ghally, E., Khalil, H., Ragab, A., & Bakr, M. (2022). Evaluation the chemical and mechanical properties of EVA modified concrete. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(4), 403-410. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.117998.5320>
- Gregorova, V., Ledererova, M., & Stefunkova, Z. (2017). Investigation of influence of recycled plastics from cable, ethylene vinyl acetate and polystyrene waste on lightweight concrete properties. *Procedia Engineering*, 195, 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.534>
- Gregorová, V., Štefunková, Z., & Ledererová, M. (2020). Experimental study of the recycled plastic aggregate lightweight composites based on different kinds of binder. *Key Engineering Materials*, 868 KEM, 32-38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.868.32>
- Ioana, A., Paunescu, L., Constantin, N., Rucai, V., Dobrescu, C., Pasare, V., & Istrate, A. (2023). High-strength and heat-insulating cellular building concrete based on calcined gypsum. *Materials*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/ma16010118>
- Ismail, M., Noruzman, A., Bhutta, M., Yusuf, T., & Ogiri, I. (2016). Effect of vinyl acetate effluent in reducing heat of hydration of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 145-151. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0045-5>
- Khan, K., Ahmad, I., & Alam, M. (2019). Effect of ethylene vinyl acetate (EVA) on the setting time of cement at different temperatures as well as on the mechanical strength of concrete. *Arabian Journal for Science and*

- Engineering*, 44(5), 4075-4084.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3249-4>
- Kulesza, M., Dębski, D., Fangrat, J., & Michalak, J. (2020). Effect of redispersible polymer powders on selected mechanical properties of thin-bed cementitious mortars. *Cement, Wapno, Beton*, 2020(3), 168-177.  
<https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.3.1>
- Lee, J., Shafiqh, P., & Bahri, S. (2019). Comparative study of mechanical properties for substitution of normal weight coarse aggregate with oil-palm-boiler clinker and lightweight expanded clay aggregate concretes. *Journal of Design and Built Environment*, 19(3), 62-77.  
<https://doi.org/10.22452/jdbe.vol19no3.7>
- Liu, S., Yang, S., Kong, Y., Wan, T., & Zhao, G. (2019). Anti-cracking property of EVA-modified polypropylene fiber-reinforced concrete under thermal-cooling cycling curing. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 34(5), 1109-1118. <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2167-y>
- Machado, R., Pereira, L., Zanelato, E., Manhães, A., Azevedo, A., Marvila, M., Alexandre, J., Monteiro, S., & Petrucci, L. (2019). Incorporation of EVA residue for production of lightweight concrete. *Minerals, Metals and Materials Series*, 673-681.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_67)
- Marques, M., Antunes, M., Mancini, S., & Oliveira, P. (2019). Interpretation of X-Ray images to investigate the viability of incorporating poly (Ethylene-Co-Vinyl Acetate) (EVA) waste in Portland cement. *Materials Science Forum*, 958 MSF, 105-110.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.958.105>
- Moreira, R., de Souza, T., Pessôa, J., Da Silva, E., & Amado, F. (2020). Study of the use of crushed sand in cementitious composites with EVA and piassava fibers. *Construction and Building Materials*, 262.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120908>
- Muñoz, S., Garcia, J. M., Charca, S., & Villena, L. (2023). Influence of the secondary aluminum chip on the physical and mechanical properties of concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1007/s41062-022-01015-3>
- Ngassam, I., Schmidt, W., Beushausen, H., & Kühne, H. (2018). Intrinsic modification of repair mortars made with EVA and CaO, impacts at early ages. *MATEC Web of Conferences*, 199.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819907004>
- Pacheco, F., Krumenauer, M., Silva, L., Tutikian, F., & Oliveira, M. (2017). Ethylene vinyl acetate (EVA) aggregates usage evaluation for lightweight concrete subfloor to reduce impact sound in flooring systems. *Revista Ingenieria de Construccion*, 32(3), 149-156.  
<https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000300149>
- Parra, C., Sánchez, E., Miñano, I., Benito, F., & Hidalgo, P. (2019). Recycled plastic and cork waste for structural lightweight concrete production. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7).  
<https://doi.org/10.3390/su11071876>
- Selvakumar, M., Geetha, S., & Muthu, L. (2022). Investigation on properties of aerated concrete with foundry sand as replacement for fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1666-1673.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.709>
- Serelis, E., & Vaitkevicius, V. (2022). Utilization of glass shards from municipal solid waste in aluminium-based ultra-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 350.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128396>
- Shang, H., Hou, G., Sun, C., Lu, D., Zhao, X., & Fan, L. (2023). EVA enhanced cementitious materials based coatings for the improvement of steel reinforcement corrosion protection performance. *Journal of Building Engineering*, 75.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107080>
- Sldozian, R., Hamad, A., & Al-Rawe, H. (2023). Mechanical properties of lightweight green concrete including nano calcium carbonate. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00247-1>
- Swarnkar, P., & Srivastava, A. (2021). Durability of styrene-butadiene latex modified cement concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(1), 1340-1342. Retrieved from Google Scholar
- Xiong, G., Wang, C., Zhou, S., Jia, X., Luo, W., Liu, J., & Peng, X. (2019). Preparation of high strength lightweight aggregate concrete with the vibration mixing process. *Construction and Building Materials*, 229.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116936>
- Zhang, Y., Du, W., Li, Y., & Yu, J. (2018). Preparation of EVA emulsion self-healing capsules for concrete and evaluation of healing properties. *Materials Science Forum*, 944 MSF, 736-744.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.944.736>

**BIOGRAPHIES**

**Juan Martín, García Chumacero**, Civil Engineer from Lord of Sipan University, studying a Master's Degree in Geology at the San Marcos National University, Lima-Peru. Engineer dedicated to the area of research as a consultant and researcher in different branches of civil engineering such as concrete technology, roads and

soil and slope stability, seismic analysis of structures among other areas, experience in writing research reports, scientific and review articles, contribution as a reviewer of a scientific article of the Journal Faculty of Engineering-University of Antioquia. Experience in supervision of educational infrastructure works and real estate projects at national level.









**Josef Alexander, Chaname Bustamante**, Civil Engineer from Lord of Sipan University. Engineer dedicated to the area of construction and supervision of infrastructure works. Experience in the technical office area in construction and consulting companies, in the quality department, testing control.



**Guillermo Gustavo, Arriola Carrasco**, Civil Engineer from Lord of Sipan University, Peru and with studies completed for a Master's degree in Road Engineering at the Ricardo Palma University, Peru. He's a designer and consultant in civil engineering projects with an emphasis on hydrology and hydraulic engineering. He has

experience in the calculation and design of works of art for roads, bridges, hydraulic works, hydrological and hydraulic modeling. Researcher and thesis advisor in hydraulic engineering, hydrology and related branches for undergraduates.

# Permeabilidad al Oxígeno en Envases para Alimentos Fabricados con Polipropileno Mediante Moldeo por Inyección

Tuárez-Párraga, Miguel Alejandro<sup>1,4\*</sup> ; Laz-Mero, Mabel<sup>2</sup> ; Córdova-Mosquera, Alexandra<sup>2\*</sup> ; Panchana-Cedeño, Ramona<sup>3</sup> ; Gavilánes-López, Pablo<sup>4</sup> ; Solórzano Zambrano, Liceth<sup>5</sup> 

<sup>1,4</sup>Fabril S.A, Departamento de Diseño e Ingeniería de Empaques, Montecristi, Ecuador

<sup>2</sup>Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Portoviejo, Ecuador

<sup>3</sup>Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Construcciones civiles, Portoviejo, Ecuador

<sup>4</sup>Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López", Carrera de Agroindustria, Calceta, Ecuador

<sup>5</sup>Universidad Técnica de Manabí, Departamento de Procesos Agroindustriales, Facultad de Agrociencias, Chone, Ecuador

**Resumen:** El estudio de los materiales de empaques ha adquirido una creciente importancia, especialmente en el envasado de alimentos sensibles al oxígeno, por lo cual se han implementado diversas tecnologías para mejorar las propiedades de barrera contra el oxígeno, con el objetivo de prolongar la vida útil de los productos. En este contexto, durante esta investigación se propuso evaluar la tasa de transmisión de oxígeno (OTR) en envases fabricados mediante moldeo por inyección, a través de diferentes tipos de polipropileno (PP). El estudio se llevó a cabo con la medición de la OTR en los diferentes tipos de envases mediante un analizador por fluorescencia óptica, exponiendo los envases a una corriente de nitrógeno en un lado y a una de oxígeno puro en el otro lado. Los resultados revelaron 44 % mayor permeabilidad en contenedores que utilizaron tapas fabricadas con copolímero de polipropileno random (CPPR) y las tarrinas fabricadas con copolímero de polipropileno en bloques (CPPB), en comparación con las tarrinas y tapas que emplearon solo CPPB. Estos hallazgos indican que el tipo de material utilizado influye significativamente en la OTR, lo cual impacta en el rendimiento de los productos envasados. Los resultados proporcionan información relevante para el desarrollo de empaques más eficientes en términos de barrera de oxígeno, lo que contribuye a garantizar la calidad y la vida útil de los productos envasados.

**Palabras clave:** Colada caliente; empaques rígidos; moldeo por inyección; polipropileno; tasa de transmisión de oxígeno; vida útil

## Oxygen Permeability in Food Packaging made of Polypropylene by Injection Molding

**Abstract:** The study of packaging materials has become increasingly important, especially in the packaging of oxygen-sensitive foods, for which various technologies have been implemented to improve the oxygen barrier properties, with the aim of prolonging the shelf life of the products. In this framework, during this research it was proposed to evaluate the oxygen transmission rate (OTR) in containers manufactured by injection molding, through different types of polypropylene (PP). The study was carried out by measuring the OTR in the different types of containers by means of an optical fluorescence analyzer, exposing the containers to a stream of nitrogen on one side and a stream of pure oxygen on the other side. The results revealed 44 % higher permeability in containers that used caps made of random copolymer polypropylene (RC-PP) and containers made of block copolymer polypropylene (BC-PP), compared to containers and caps using only BPCP. These findings indicate that the type of material used significantly influences the OTR, which impacts the performance of packaged products. These results provide relevant information for the development of more efficient packaging in terms of oxygen barrier, which contributes to guaranteeing the quality and shelf life of packaged products.

**Keywords:** Hot runner; rigid packaging; injection molding; polypropylene; oxygen transmission rate; shelf life

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los consumidores de alimentos envasados están cada vez más preocupados por la seguridad y la calidad de los productos que consumen (Lara-Gómez et al., 2022). La

incidencia de enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) ha generado una mayor conciencia sobre la importancia de tener empaques que aseguren la protección de los alimentos que a su vez, preserven sus propiedades organolépticas, físicas

\*mtuarez@lafabril.com.ec

Recibido: 23/07/2023

Aceptado: 25/01/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/rp.vol53n2.03

CC 4.0

y químicas durante su vida útil de anaquel (Korte et al., 2023; Xie et al., 2019).

Diversos estudios, como los realizados por AMERIPEN (American Institute for Packaging and the Environment, s.f.) y Williams et al. (2020), han revelado que aproximadamente del 20 % al 25 %, de los alimentos envasados se desperdicia debido a problemas relacionados con el empaque. Esto ha llevado a la necesidad de desarrollar soluciones que mejoren el desempeño de los envases en términos de protección y conservación de los alimentos. Investigadores como Mahand et al. (2023); Siracusa et al. (2018) y Zabihzadeh Khajavi et al. (2020) han resaltado la importancia de usar materiales de empaques con altas propiedades de barrera al oxígeno, para garantizar la calidad de los productos alimenticios durante su vida útil.

Es importante destacar que la permeabilidad al oxígeno surge como una propiedad fundamental que determina la cantidad de oxígeno que puede atravesar los materiales y llegar al interior del empaque. Este flujo de oxígeno acelerado puede desencadenar la degradación de los alimentos (Priyanka et al., 2023). La medición y comprensión de la permeabilidad al oxígeno resulta crucial para evaluar la eficacia de los materiales de empaque en la protección de los alimentos contra la oxidación y el deterioro causados por la presencia de oxígeno (Keller & Kouzes, 2017; Prasad et al., 2018).

En el desarrollo de envases, es de vital importancia asegurar una barrera adecuada contra la entrada de oxígeno desde el exterior (Andrade et al., 2023; Mueller et al., 2012). Cuando el oxígeno penetra en el envase, puede provocar el deterioro de los componentes orgánicos, acelerando así el proceso de descomposición de los alimentos y ocasionando la pérdida de su valor nutritivo. Además, la presencia de oxígeno favorece la oxidación de nutrientes importantes y puede contribuir al crecimiento de microorganismos que pueden llegar a ser patógenos (Dey & Neogi, 2019).

Se ha evidenciado que los alimentos grasos son más sensibles al oxígeno, por tal motivo en su presencia se genera una cascada de nuevas oxidaciones que terminan por descomponer las grandes moléculas originales de las grasas en pequeños fragmentos con un olor fuerte, debido a la oxidación de los radicales de ácidos grasos de los compuestos glicéricos para formar aldehídos, cetonas y ácidos volátiles que son los responsables de la rancidez oxidativa (Laz-Mero et al., 2021; Padmaja et al., 2023).

En base a estos antecedentes, se han desarrollado diversas estrategias con el objetivo de reducir el flujo de oxígeno hacia el interior del empaque para mitigar los efectos que pueden generar alteraciones en los productos alimenticios, buscando alternativas tecnológicas sostenibles (Zubair & Ullah, 2019). Un enfoque recomendado por Tuárez-Párraga et al. (2022a) es el uso de proceso de extrusión-inyección con tecnología de colada caliente y el empleo de polipropileno (PP) como materia prima para estar en contacto directo durante el envasado de alimentos.

Este proceso de transformación polimérica ofrece un buen rendimiento en términos de producción de envases seguros, especialmente adecuados para líquidos acuosos y algunos líquidos orgánicos (Tariq et al., 2020). Por otra parte, el PP brinda propiedades físicas, mecánicas y térmicas favorables, convirtiéndolo en una opción adecuada para el envasado de alimentos que pasan por procesos térmicos para eliminación de microorganismos patógenos (da Silva et al., 2022; Ouardi et al., 2022; Zhong et al., 2022).

Sin embargo, el contacto con los alimentos puede afectar el rendimiento de los polímeros, por lo que es importante estudiar las características de barrera en condiciones reales. Por ejemplo, la absorción de vapor o líquidos ambientales puede aumentar la plasticidad del polímero y disminuir sus propiedades mecánicas (Siracusa, 2012; Wu et al., 2021).

En la búsqueda de soluciones, se han realizado estudios sobre el procesamiento de empaques de aluminio, tereftalato de polietileno (PET) y PP, que han demostrado resultados prometedores en la reducción de la permeabilidad al oxígeno (Kim et al., 2020; Lorini et al., 2018). Sin embargo, Çapkin & Göknelma (2023) señalan que los empaques laminados con aluminio generan un alto impacto ambiental debido a las dificultades para separar sus capas durante el reciclaje, debido a que no son materiales misibles dentro de procesos de reciclaje, separación y posterior pelletizado de resinas postconsumo (PCR).

De los materiales mencionados anteriormente, Tuárez-Párraga et al. (2022b) destacan que el PP es el polímero más utilizado a nivel mundial por su versatilidad, practicidad, propiedades físico-químicas, entre otras características especiales, el cual cuenta con 19,4 % de participación de un total de 368 millones de toneladas de plástico producidas. Además, puede ser fácilmente transformado mediante procesos de termoformado, moldeado por soplado e inyección, siendo este último el proceso más utilizado para fabricación de envases.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo evaluar la permeabilidad al oxígeno en empaques fabricados con diferentes tipos de PP, mediante el moldeo por inyección con colada caliente. Esta investigación resulta de gran relevancia, debido a que busca comprender el fenómeno de oxidación en los envases rígidos, con el propósito de desarrollar soluciones eficientes que mejoren la calidad y la seguridad de los productos alimenticios envasados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de permeabilidad al oxígeno, se utilizaron empaques conformados por tarrinas y tapas obtenidas mediante el proceso de moldeo por inyección con una máquina NETSTAL modelo ELION HYBRID con capacidad 420 Tn de cierre y sus respectivos moldes de colada caliente, los empaques (tarrinas + tapas) fueron fabricadas con resinas comerciales de polipropileno con Melt Flow Index (MFI) detallado en la Tabla 1.

Los empaques inyectados permanecieron en temperatura de  $23 \pm 2$  °C, durante 72 horas para concluir el proceso de

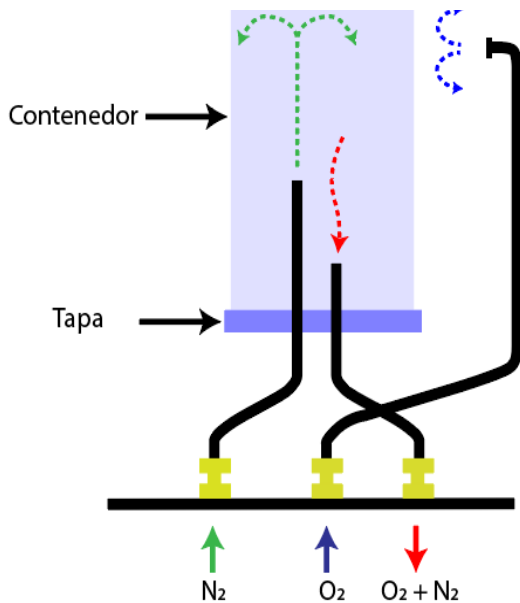


contracción, posterior a aquello, se tomaron tres muestras aleatorias por cada tipo de material y se ensamblaron manualmente. Para determinar el OTR se utilizó la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) F2714-08 (2013) que establece el método de prueba estándar para el análisis del espacio de cabeza de oxígeno en envases mediante un analizador por fluorescencia óptica.

**Tabla 1.** Partes del empaque por tipo de materia prima

Identificación	Partes del empaque	Material	MFI - g/10 min
CPPB-01	Tarrina	CPPB	80
	Tapa	CPPB-01	80
CPPB-02	Tarrina	CPPB	80
	Tapa	CPPB-02	80
CPPR-03	Tarrina	CPPB	80
	Tapa	CPPR-03	45

. El ensayo se llevó a cabo empleando un equipo OX-TRAN, modelo 2/61 (Mocon, Inc), sensores ópticos de oxígeno, cámara de atemperamiento de la firma Heraeus Vötsch, modelo HC 0020, pie de rey digital Mitutoyo y un comparador de carátula análogo 2109F. Los envases evaluados presentaron 665 cm<sup>3</sup> volumen de espacio de cabeza y cada empaque (contenedor + tapa) se evaluó por duplicado, en donde se expusieron a una corriente de nitrógeno por una cara y por la otra a una corriente de oxígeno puro como se muestra en la Figura 1, las cuales permanecieron en modo continuo a 23 ± 2 °C, 50 ± 10 % de Humedad Relativa (HR), con un barrido constante de nitrógeno dentro del empaque para la estabilización del contenido de oxígeno en su interior.

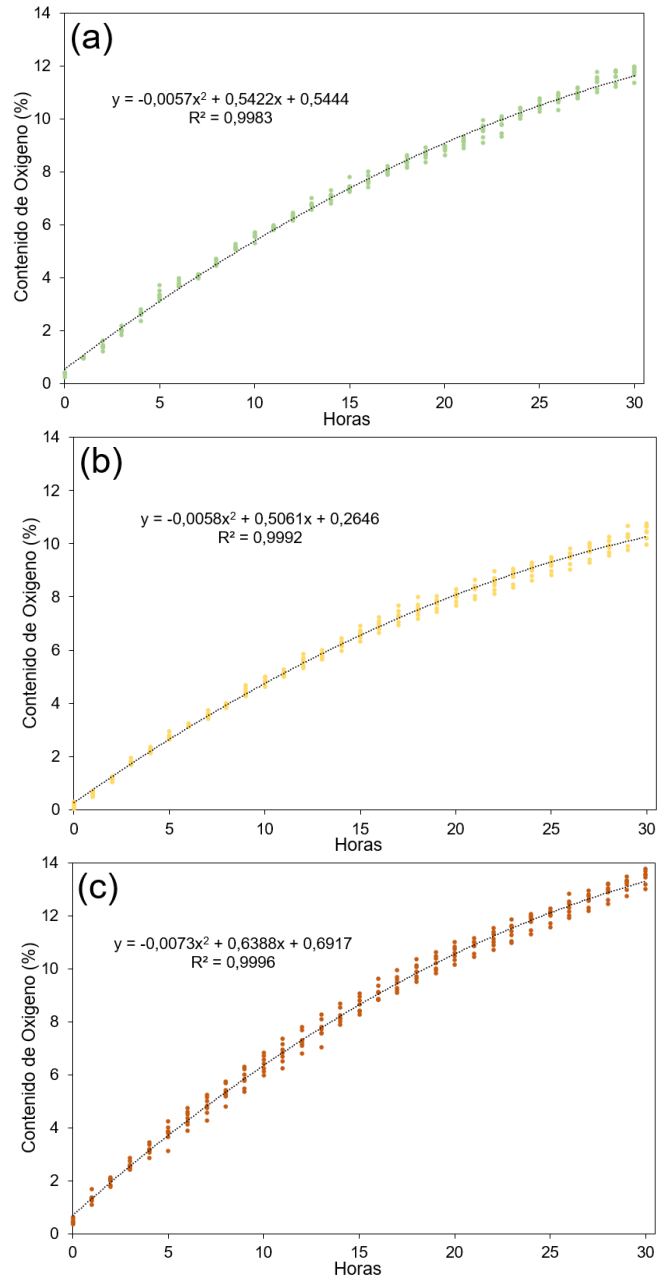


**Figura 1.** Esquema de la permeabilidad al oxígeno en envases rígidos

Las unidades para determinar la permeabilidad al oxígeno en envases rígidos fueron expresadas en cm<sup>3</sup>/(pkg·day) ó cm<sup>3</sup>/(packaging·day) como lo plantea Buntinx et al. (2014). El tratamiento estadístico de los resultados se realizó mediante un análisis de tres grupos independientes utilizando el software SPSS.

### 3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Previo al inicio del ensayo, se estabilizaron los envases al cabo de 30 horas, y se obtuvieron resultados de contenido de oxígeno estable que oscilaron entre el 9,97 % y el 13,56 %, como se muestran en las Figuras 2a, 2b y 2c, los envases que presentaron menor contenido a lo largo del proceso de estabilización corresponden a los envases CPPB-01 y CPPB-02, como se muestran en las Figuras 2a y 2b, respectivamente.



**Figura 2.** Tiempo de estabilización de los envases al oxígeno (a) CPPB-01; (b) CPPB-02; (c) CPPR-03

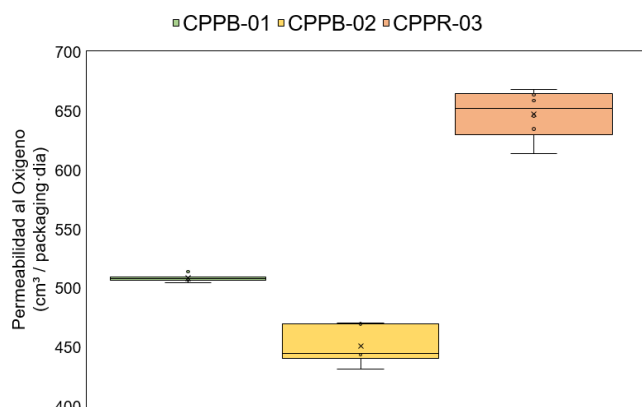
Con el periodo de estabilización se mantuvo el tiempo suficiente para que el oxígeno se disperse uniformemente dentro del sistema hasta alcanzar el equilibrio, el cual permite eliminar variaciones y asegurar la tasa de permeabilidad uniforme que permite garantizar mediciones precisas. Los resultados obtenidos durante las pruebas de permeabilidad a envases fabricados con diferentes tipos de materia prima a base de PP se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados de OTR en empaques con diferentes tipos de materias primas

Identificación	Partes del empaque	Material	OTR cm <sup>3</sup> / (pkg·day)
CPPB-01	Tarrina Tapa	CPPB	509 ± 3
CPPB-02	Tarrina Tapa	CPPB	445 ± 16
CPPR-03	Tarrina Tapa	CPPR-03	653 ± 20

Los datos son comparados entre sí, mediante el programa estadístico SPSS, presentando principios de normalidad ( $p > 0.05$ ), sin embargo, tienen ausencia de Homocedasticidad ( $p < 0.05$ ), por lo cual se procede al uso de un análisis ANOVA no paramétrico (H de Kruskal-Wallis) para los tres grupos independientes. De lo cual se evidencia que los resultados obtenidos mediante la prueba de H de Kruskal-Wallis para el OTR son ( $p < 0,05$ ), demuestran una diferencia significativa dentro de la distribución de OTR, es decir, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo que se determina estadísticamente diferencias significativas entre los tipos de materias primas utilizadas para fabricar sus respectivas tapas.

En la Figura 3, se observa que los envases que utilizaron tapas con la materia prima CPPR-03, presentan 27 % mayor permeabilidad que los envases que utilizan tapas fabricadas con CPPB-01 y 44 % más que con las tapas de CPPB-02. Además de aquello, los empaques conformados por un solo tipo de resina CPPB presentan menor variabilidad de OTR a diferencia de los envases que tienen las tapas fabricadas con CPPR.



**Figura 3.** Resumen gráfico de la permeabilidad con diferentes tipos de resinas

Los resultados de OTR obtenidos con empaques rígidos de PP y con diferentes materias primas oscilan en un rango de 448 a 679 cm<sup>3</sup>/(pkg·day), son obtenidos con empaques de espesores entre  $0,55 \pm 0,20$  mm, a diferencia de lo descrito, en investigaciones realizadas por Van Bree et al. (2010), quienes lograron estimar la OTR en botellas y tapones, y cerraron las dos piezas plásticas manualmente con valores para botellas de PET [500 ml; OTR= 0,17 cm<sup>3</sup>/(pkg·day) a 22 °C, 50 % HR] y en tapas de PP [OTR= 0,0611 cm<sup>3</sup>/(pkg·day) a 22 °C, 50 % HR]. De similar manera, Lange & Wyser (2003) evaluaron envases rígidos fabricados mediante coinyección empleando

PP con OTR de 9 cm<sup>3</sup>/(pkg·day), ambos resultados reportados son inferiores de los obtenidos en el presente estudio.

Por otra parte, Armingol Marro (2020) determinó OTR de 47 cm<sup>3</sup>·mm/m<sup>2</sup>·day·atm en empaques flexibles de PP a 23°C, los cuales difieren de lo descrito anteriormente. Cabe resaltar que, en envases rígidos se deprecian las unidades de espesor y área por la irregularidad de las mismas a diferencia de los envases flexibles, que tienen espesor uniforme y con mayor facilidad de ser cuantificados. Por su parte, Ebadi-Dehaghani et al. (2015) determinaron OTR de 354 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day·atm, utilizando muestras moldeadas por compresión con un espesor entre 0,10 a 0,15 mm. Otros estudios realizados por Castro-Landinez et al. (2021) alcanzaron OTR de  $123,18 \pm 2,44$  cm<sup>3</sup>·mm/m<sup>2</sup>·day·atm, al evaluar láminas de PP moldeadas por compresión con espesor de 0,30 mm lo cual es equivalente a 45 % menos del espesor detallado en la presente investigación.

En efecto, la permeabilidad está afectada por factores intrínsecos tales como tipo de polímeros, permeante y temperatura (Fuoco et al., 2018). En el presente estudio, se mantuvieron las temperaturas y el tipo de permeante, por lo cual se enfocó en la permeabilidad en el tipo de polímero, debido a que, está en función de dos factores claves, en primer lugar, es la forma de las cadenas poliméricas entre sí y el tipo de atracción que establece entre el polímero y el permeante. Cuando mayor sea la cohesión molecular interna y menor la atracción entre el tipo de resina con el permeante, mejor barrera tendrá el material a evaluar. En segundo lugar, se encuentra el volumen libre que queda entre las cadenas, la difusión del permeante a través del polímero se realiza alcanzando los espacios que las cadenas dejan libres, y pasa de una a otra sección mediante saltos activados, cuantos menos espacios intermoleculares libres existan, menos posibilidades tendrá de pasar el permeante (Giménez Torres, 2001).

Otro punto, es que la regularidad en la polimerización y la simetría afectan el transporte molecular en los materiales poliméricos, por lo tanto, de ellas depende la posible cristalinidad del polímero, la densidad y la movilidad de las cadenas (Chi Caballero, 2020). Adicional a lo mencionado, los aditivos y plastificantes que se incluyen al material con el objetivo de modificar sus propiedades, generalmente aumentan la permeabilidad del material, debido a que se introducen entre la estructura del polímero y provocan un debilitamiento de la misma. Esto favorece la aparición de espacios intermoleculares (huecos) y disminuye la interacción entre cadena con un efecto lubricante lo que permite la movilidad entre ellas (Van Bree et al., 2010).

Del mismo modo, Xiao et al. (2003) describen la importancia del contenido de etileno en la formulación de un copolímero que proporciona significativas propiedades de resistencia al impacto, sin embargo, disminuye la regularidad estructural especialmente en la velocidad de cristalización con la influencia de agentes nucleantes.

En este contexto, la mezcla de PP y Polietileno (PE) permite comprender su reutilización en aplicaciones de alta demanda y favorece el desarrollo sostenible del mercado del plástico. A pesar de tener propiedades similares, el PP y el PE son

inmiscibles, por lo que las propiedades finales del material mezclado son inferiores a las propiedades de los componentes individuales (Ashish et al., 2023).

Por lo general, cuando polímeros inmiscibles se mezclan en la masa fundida, el componente menor se dispersa en gotas dentro de la matriz formada por el componente, y dada la alta tensión interfacial, se favorece la coalescencia de la fase dispersa (Fortelný & Jůza, 2019). En consecuencia, se obtienen partículas de gran tamaño y la transferencia de tensiones es deficiente en la interfaz, lo que se traduce en propiedades mecánicas finales deficientes (Coba-Daza et al., 2022).

Además, los aditivos abarcan una amplia gama de sustancias que ayudan al procesamiento o añaden valor al producto final (Baserinia et al., 2022). La mayoría de los aditivos son incorporados a una familia de resinas por el proveedor y forman parte de un paquete patentado. Es decir, se pueden escoger grados de resina de policarbonato estándar con aditivos para mejorar el desmoldeo de las piezas plásticas, la estabilización UV (ultravioleta) y retardante de llama; o puede elegir grados de nylon con aditivos para mejorar la resistencia al impacto (Bhunia et al., 2013; Barlier et al., 2023).

Por otra parte, los materiales nanoestructurados han despertado un gran interés en el ámbito alimentario debido a sus propiedades mejoradas, tales como resistencia mecánica y propiedades de barrera, así como su capacidad para brindar actividades antimicrobianas y antioxidantes, lo que contribuye a mantener la calidad y prolongar la vida útil de diversos productos alimentarios (Jagtiani, 2022). En este sentido, se han utilizado varios materiales nanoestructurados, como nanoarcillas de silicato, nanopartículas de óxido metálico y nanopartículas y nanocristales de celulosa, en sistemas de envasado de alimentos para conferirles propiedades funcionales (Idumah et al., 2020; Rivadeneira-Velasco et al., 2021;). No obstante, es importante mencionar que la seguridad de estos materiales nanoestructurados sigue siendo objeto de debate (Sothornvit, 2019).

A esto se suma, que las zeolitas, a pesar de tener una composición química similar a las arcillas y minerales arcillosos que han sido ampliamente investigados en diversas aplicaciones alimentarias, han sido poco estudiadas en este campo (Li et al., 2017). Sin embargo, se han descubierto múltiples usos para las zeolitas en la industria alimentaria, como materiales antimicrobianos, secuestrantes de etileno, rellenos para envases de alimentos, nanorreactores, sensores de sustancias alimentarias, inmovilizadores y estabilizadores de compuestos activos y enzimas, tamices moleculares para el pretratamiento de muestras de alimentos, así como materiales inteligentes en contacto con alimentos (Villa et al., 2022). Estas aplicaciones se basan en las propiedades adsorbentes, el intercambio iónico, entre otras.

Adicionalmente, los nanocompuestos de polímeros que contienen nanoplaquetas tienen factores clave que influyen en su rendimiento como barrera de gas. Estos factores incluyen la morfología de dispersión, la estructura interfacial y la estructura cristalina de los polímeros de matriz, los cuales se

pueden ajustar para maximizar la eficacia de la barrera de gas (Zarshad et al., 2022).

Además, se presentan los desafíos actuales y las perspectivas para el futuro desarrollo de materiales de empaque de polímeros de alta barrera. Se reconoce una nueva visión de la relación entre polímeros. En cuanto a la estructura química intrínseca, se pueden clasificar en tres categorías en términos de sus propiedades de barrera contra el oxígeno. Los polímeros no polares, como el PE, PP y poliestireno (PS), presentan una barrera de oxígeno deficiente. Sin embargo, al introducir estructuras químicas polares, como ésteres, amidas o grupos ciano, las interacciones intermoleculares mejoradas reducirán el volumen libre y limitarán la actividad de movimiento de las cadenas moleculares (Panou & Karabagias, 2023). Por lo tanto, los materiales poliméricos polares, como el PET, nailon 6 (PA6) y poliácridonitrilo (PAN), presentan una propiedad de barrera de oxígeno promedio. El policloruro de vinilideno (PVDC) y el Etilen-Vinil-Alcohol (EVOH) son reconocidos por su excelente capacidad de barrera contra el oxígeno (Li et al., 2020). Además, el rendimiento de barrera de EVOH se puede modificar simplemente ajustando el contenido de alcohol vinílico (Huang et al., 2023).

La permeabilidad a sustancias de bajo peso molecular, como los gases, la humedad y los vapores orgánicos, es una de las propiedades limitantes de los materiales poliméricos en el campo del envasado de alimentos (Giacinti Baschetti & Minelli, 2020). Aunque existen excelentes materiales de alta barrera a los gases, como los copolímeros de etileno y EVOH, las poliamidas y los poliésteres, algunos de estos materiales presentan desafíos, como la susceptibilidad a la plastificación con la humedad o la dificultad para el sellado térmico (Shaikh et al., 2021; Fasake et al., 2021). Como solución, se suelen combinar con polímeros hidrófobos como el polipropileno o el polietileno, o se encapsulan en estructuras multicapa con estos polímeros hidrófobos. Las propiedades de sorción y difusión de los copolímeros de EVOH y sus mezclas con polipropileno son de especial interés tanto a nivel teórico como práctico (Lasagabáster et al., 2009).

De similar manera, los agentes desmoldantes internos pueden lograr mejoras de procesos y facilidad para desmoldeo durante la expulsión de las piezas fabricadas y la identidad de este aditivo rara vez se da a conocer, pero a menudo se trata de polvos fluoropolímeros finos, llamados micro polvos, resinas de silicona o ceras (McKeen, 2012). En este sentido, mediante la adición de un agente clarificador a base de sorbitol que es ampliamente conocido en la literatura, generan ganancia en las propiedades ópticas del polipropileno y esta mejora se atribuye a la significativa disminución del tamaño de las esferulitas y el consiguiente aumento de la densidad de los núcleos (Drummond et al., 2019).

Es importante mencionar que, existen empaques que presentan una serie de defectos, como bajas propiedades antimicrobianas, alta permeabilidad al oxígeno y/o a la humedad, que pueden solucionarse añadiendo un componente de refuerzo (Hsissou et al., 2021; Nejatian et al., 2023), y que según Kim et al. (2021) pueden modificar las propiedades de permeabilidad en los envases en función de la temperatura,

reduciendo así los efectos perjudiciales del gas en el interior de los productos envasados, como la aceleración de la maduración y la reducción de la vida útil de los productos frescos. Por ejemplo, Castro-Landinez et al. (2021) indican que el EVOH es muy conocido como material polimérico de baja permeabilidad al oxígeno; entre 0,4 a 3  $\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$  que, agregándole al PP mejora la barrera al oxígeno, a diferencia del etileno acetato de vinilo (EVA) tiene una permeabilidad al oxígeno mayor, que oscila entre 800 a 1000  $\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ , los cuales son superiores a los reportados en el presente trabajo.

En adición a lo descrito, el envasado activo, como su nombre lo indica, tiene en cuenta estos aspectos. En un sistema de envasado activo, existe una interacción entre el producto alimentario, el envase y el medio ambiente con el fin de mejorar la vida útil y mantener la calidad del producto (Aragüez et al., 2020).

Los materiales de envasado convencionales no pueden controlar activamente los fenómenos de deterioro de los alimentos durante el almacenamiento, al tiempo que ofrecen la barrera solicitada contra el oxígeno, la humedad y la luz, que sólo puede considerarse una buena protección para los alimentos más sensibles. El envasado activo es una de las tecnologías innovadoras que se están desarrollando para ampliar la función protectora de los materiales de envasado y aumentar así la vida útil de los productos alimentarios (Glicerina et al., 2023). Estos sistemas de envasado están diseñados para incorporar deliberadamente componentes que liberan o adsorben sustancias (por ejemplo, oxígeno, etileno, agua, etc.).

En síntesis, este estudio presenta resultados que aportan conocimientos sobre permeabilidad al oxígeno para estimaciones de vida útil en alimentos que sean envasados en empaques de PP, lo cual evidencia que el uso de los empaques con copolímeros de bloque (CPPB) otorgan menores resultados de OTR al oxígeno y por ende mejores barreras para incrementar la vida útil de los alimentos por oxidación. Esto reduce al mismo tiempo el uso de conservantes y desperdicio de alimentos, lo contrario ocurre con el uso de empaques que incorporan CPPR durante el proceso de transformación polimérica.

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la presente investigación, los autores concluyen que las tapas fabricadas por el proceso de moldeo por inyección con colada caliente utilizando materiales de copolímero de polipropileno random afectan significativamente la permeabilidad al oxígeno de los envases en condiciones estándares, por lo cual se genera mayor rapidez del fenómeno de oxidación en productos envasados.

Estos resultados son válidos para comparar envases fabricados con polipropileno moldeados por procesos de inyección con colada caliente que tengan similares capacidades volumétricas y espesores. Debido a esto, es recomendable fomentar estudios con diferentes materiales, en condiciones ambientales

extremas que simulen comportamientos reales de los envases durante la cadena logística.

Las limitaciones del presente estudio están asociadas a la falta de información precisa sobre la permeabilidad al oxígeno en envases rígidos, a causa de varios factores. En primer lugar, existe dificultad para calcular el área exacta de los envases, así como diferencias en los calibres de los mismos. Además, los ensayos se llevan a cabo en condiciones controladas y estandarizadas, lo que puede no reflejar fielmente las condiciones reales de almacenamiento y uso. Por otro lado, es importante tener en cuenta que, en algunas ciudades con altas temperaturas y niveles de humedad relativa, los resultados de la permeabilidad al oxígeno en los envases pueden verse afectados, lo que a su vez puede influir en su vida útil.

#### REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials ASTM F2714-08(2013). (2013). *Standard Test Method for Oxygen Headspace Analysis of Packages Using Fluorescent Decay* (ASTM F2714-08(2013)). [https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmf271408\\_2013](https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmf271408_2013)
- AMERIPEN Report - American Institute for Packaging and the Environment. (s. f.). *Quantifying the Value of Packaging as a Strategy to Prevent Food Waste in America*. Recuperado 1 de abril de 2023, de <https://www.ameripen.org/page/foodwastereport>
- Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Cerqueira, M. A., Azevedo, A. G., Barros, C., Machado, A. V., Coelho, A., Furtado, R., Correia, C. B., Saraiva, M., Vilarinho, F., Silva, A. S., & Ramos, F. (2023). PLA films loaded with green tea and rosemary polyphenolic extracts as an active packaging for almond and beef. *Food Packaging and Shelf Life*, 36, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101041>
- Aragüez, L., Colombo, A., Borneo, R., & Aguirre, A. (2020). Active packaging from triticale flour films for prolonging storage life of cherry tomato. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100520>
- Armingol Marro, M. Á. (2020). *Caracterización y aplicabilidad de envases bio-basados en productos vegetales mínimamente procesados* [Tesis pregrado, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/96458>
- Ashish, P. K., Sreeram, A., Xu, X., Chandrasekar, P., Jagadeesh, A., Adwani, D., & Padhan, R. K. (2023). Closing the Loop: Harnessing waste plastics for sustainable asphalt mixtures – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 400, 132858. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132858>
- Barlier, C., Abel, C., & Rennesson, J.-L. (2023). Applications for Packaging. En E. Pei, A. Bernard, D. Gu, C. Klahn, M. Monzón, M. Petersen, & T. Sun (Eds.), *Springer Handbook of Additive Manufacturing* (pp. 963-979). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_58)

- Baserinia, R., Brockbank, K., & Dattani, R. (2022). Correlating polyamide powder flowability to mechanical properties of parts fabricated by additive manufacturing. *Powder Technology*, 398, 117147. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117147>
- Bhunia, K., Sablani, S. S., Tang, J., & Rasco, B. (2013). Migration of Chemical Compounds from Packaging Polymers during Microwave, Conventional Heat Treatment, and Storage. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(5), 523-545. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12028>
- Buntinx, M., Willems, G., Knockaert, G., Adons, D., Yperman, J., Carleer, R., & Peeters, R. (2014). Evaluation of the Thickness and Oxygen Transmission Rate before and after Thermoforming Mono- and Multi-layer Sheets into Trays with Variable Depth. *Polymers*, 6(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym6123019>
- Çapkın, İ., & Göknelma, M. (2023). A review on characterization and recyclability of pharmaceutical blisters. *Cleaner Waste Systems*, 4, 100082. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100082>
- Castro-Landinez, J. F., Salcedo-Galan, F., & Medina-Perilla, J. A. (2021). Polypropylene/Ethylene—And Polar—Monomer-Based Copolymers/Montmorillonite Nanocomposites: Morphology, Mechanical Properties, and Oxygen Permeability. *Polymers*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/polym13050705>
- Chi Caballero, J. F. (2020). *Estudio del efecto de la modificación morfológica de películas sopladadas de polipropileno con paligorskita sobre su permeabilidad a diferentes gases* [Ph.D. Thesis, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.]. [https://ciicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1741/1/PCM\\_D\\_Tesis\\_2020\\_Josue\\_Chi.pdf](https://ciicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1741/1/PCM_D_Tesis_2020_Josue_Chi.pdf)
- Coba-Daza, S., Carmeli, E., Otaegi, I., Aranburu, N., Guerrica-Echevarria, G., Kahlen, S., Cavallo, D., Tranchida, D., & Müller, A. J. (2022). Effect of compatibilizer addition on the surface nucleation of dispersed polyethylene droplets in a self-nucleated polypropylene matrix. *Polymer*, 263, 125511. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125511>
- da Silva, D. J., de Oliveira, M. M., Wang, S. H., Carastan, D. J., & Rosa, D. S. (2022). Designing antimicrobial polypropylene films with grape pomace extract for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100929. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100929>
- Dey, A., & Neogi, S. (2019). Oxygen scavengers for food packaging applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.013>
- Drummond, C. F., Damas, M. S. P., Merlini, C., & Battisti, R. (2019). Influence of clarifying agent on the properties of polypropylene copolymer industrially injected cups for Brazilian cream cheese. *International Journal of Plastics Technology*, 23(2), 170-176. <https://doi.org/10.1007/s12588-019-09245-4>
- Ebadi-Dehaghani, H., Barikani, M., Khonakdar, H. A., Jafari, S. H., Wagenknecht, U., & Heinrich, G. (2015). On O<sub>2</sub> gas permeability of PP/PLA/clay nanocomposites: A molecular dynamic simulation approach. *Polymer Testing*, 45, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.05.010>
- Fasake, V., Shelake, P. S., Srivastava, A., & Dashora, K. (2021). Characteristics of Different Plastic Materials, Properties and their Role in Food Packaging. *Current Nutrition & Food Science*, 17(9), 944-954. <https://doi.org/10.2174/1573401317666210505100139>
- Fortelný, I., & Jůza, J. (2019). Description of the Droplet Size Evolution in Flowing Immiscible Polymer Blends. *Polymers*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/polym11050761>
- Fuoco, A., Comesaña-Gándara, B., Longo, M., Esposito, E., Monteleone, M., Rose, I., Bezzu, C. G., Carta, M., McKeown, N. B., & Jansen, J. C. (2018). Temperature Dependence of Gas Permeation and Diffusion in Triptycene-Based Ultrapermeable Polymers of Intrinsic Microporosity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(42), 36475-36482. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13634>
- Giacinti Baschetti, M., & Minelli, M. (2020). Test methods for the characterization of gas and vapor permeability in polymers for food packaging application: A review. *Polymer Testing*, 89, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106606>
- Giménez Torres, E. (2001). Desarrollo y caracterización de sistemas de alta barrera basados en un copolímero de etileno y alcohol vinílico (EVOH) para su aplicación en estructuras multicapa termoconformadas en la industrial del envasado [Ph.D. Thesis, Universitat Jaume I]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/10559>
- Glicerina, V., Siroli, L., Gottardi, D., Ticchi, N., Capelli, F., Accorsi, R., Gherardi, M., Minelli, M., Fiorini, M., Andrisano, V., Colombo, V., Manzini, R., Lanciotti, R., & Romani, S. (2023). Influence of an innovative, biodegradable active packaging on the quality of sunflower oil and “pesto” sauce during storage. *Applied Food Research*, 3(2), 100313. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100313>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Huang, H.-D., Ren, P.-G., Zhong, G.-J., Olah, A., Li, Z.-M., Baer, E., & Zhu, L. (2023). Promising strategies and new opportunities for high barrier polymer packaging films. *Progress in Polymer Science*, 144, 101722. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101722>
- Idumah, C. I., Zurina, M., Ogbu, J., Ndem, J. U., & Igba, E. C. (2020). A review on innovations in polymeric nanocomposite packaging materials and electrical sensors for food and agriculture. *Composite Interfaces*, 27(1), 1-72. <https://doi.org/10.1080/09276440.2019.1600972>
- Jagtiani, E. (2022). Advancements in nanotechnology for food science and industry. *Food Frontiers*, 3(1), 56-82. <https://doi.org/10.1002/fft2.104>
- Keller, P. E., & Kouzes, R. T. (2017). *Water Vapor Permeation in Plastics* (PNNL-26070). Pacific

- Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States). <https://doi.org/10.2172/1411940>
- Kim, D., Thanakkasaranee, S., Lee, K., Sadeghi, K., & Seo, J. (2021). Smart packaging with temperature-dependent gas permeability maintains the quality of cherry tomatoes. *Food Bioscience*, *41*, 100997. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100997>
- Kim, J.-K., Choi, B., & Jin, J. (2020). Transparent, water-stable, cellulose nanofiber-based packaging film with a low oxygen permeability. *Carbohydrate Polymers*, *249*, 116823. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116823>
- Korte, I., Albrecht, A., Mittler, M., Waldhans, C., & Kreyenschmidt, J. (2023). Quality impact of sustainable ma-packaging options for emulsion-type sausage: A German case study. *Future Foods*, *7*, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100218>
- Lange, J., & Wyser, Y. (2003). Recent innovations in barrier technologies for plastic packaging—A review. *Packaging Technology and Science*, *16*(4), 149-158. <https://doi.org/10.1002/pts.621>
- Lara-Gómez, A. B., Aguirre-Loredo, R. Y., Castro-Rosas, J., Rangel-Vargas, E., Hernández-Juárez, M., & Gómez-Aldapa, C. A. (2022). Películas de almidón de papa (*Solanum tuberosum* L.), empaques innovadores para alimentos: Una revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *10*(19), Article 19. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.8965>
- Lasagabáster, A., Abad, M. J., Barral, L., Ares, A., & Bouza, R. (2009). Application of FTIR spectroscopy to determine transport properties and water-polymer interactions in polypropylene (PP)/poly(ethylene-co-vinyl alcohol) (EVOH) blend films: Effect of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) content and water activity. *Polymer*, *50*(13), 2981-2989. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.04.005>
- Laz-Mero, M. L., Tuárez-Párraga, M. A., & Córdova-Mosquera, R. A. (2021). Estabilidad oxidativa del aceite de girasol en diferentes condiciones de almacenamiento. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*. e-ISSN 2477-8982, *11*(2), Article 2. [https://doi.org/10.33936/la\\_tecnica.v0i26.4108](https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i26.4108)
- Li, Y., Li, L., & Yu, J. (2017). Applications of Zeolites in Sustainable Chemistry. *Chem*, *3*(6), 928-949. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.10.009>
- Li, Y., Zhang, K., Nie, M., & Wang, Q. (2020). Chapter 19—Application of compatibilized polymer blends in packaging. En A. A. r. & S. Thomas (Eds.), *Compatibilization of Polymer Blends* (pp. 539-561). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816006-0.00019-0>
- Lorini, A., Wobeto, C., Rosa, C. C. B. da, Hatem, T. A., & Botelho, S. de C. C. (2018). Influence of packaging on the quality of Brazil nuts. *Acta Amazonica*, *48*(4), 368-372. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201701772>
- Mahand, S. N., Yazdanbakhsh, A., Tayouri, M. I., Zarei, A., Nouranian, S., Ruckdäschel, H., & Khonakdar, H. A. (2023). Theoretical and experimental investigation of selective gas permeability in polystyrene/polyolefin elastomer/nanoclay nanocomposite films. *Polymer Testing*, *120*, 107960. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107960>
- McKeen, L. W. (2012). 1—Introduction to Permeation of Plastics and Elastomers. En *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* (3era ed., pp. 1-20). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3469-0.10001-3>
- Mueller, K., Schoenweitz, C., & Langowski, H.-C. (2012). Thin Laminate Films for Barrier Packaging Application – Influence of Down Gauging and Substrate Surface Properties on the Permeation Properties. *Packaging Technology and Science*, *25*(3), 137-148. <https://doi.org/10.1002/pts.966>
- Nejatian, M., Ghandehari Yazdi, A. P., Khorasani, S., & Simal-Gandara, J. (2023). Increasing the shelf life of fresh in-hull pistachio using nanocomposite packaging of zinc nanoparticles and pistachio green hull essential oil. *Scientia Horticulturae*, *313*, 111888. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111888>
- Ouardi, A., Wahid, A., Sadoki, B., Mouhib, N., & ELghorba, M. (2022). Effect of residual stresses on the fracture of polypropylene (PPR) pipes. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *119*, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103330>
- Padmaja, P. G., Kalaisekar, A., Venkateswarlu, R., Shwetha, S., Rao, B. D., & Tonapi, V. A. (2023). Thermal treatment in combination with laminated packaging under modified atmosphere enhances the shelf life of pearl millet flour. *Food Chemistry Advances*, *2*, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100190>
- Panou, A., & Karabagias, I. K. (2023). Biodegradable Packaging Materials for Foods Preservation: Sources, Advantages, Limitations, and Future Perspectives. *Coatings*, *13*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/coatings13071176>
- Prasad, K., Nikzad, M., & Sbarski, I. (2018). Permeability control in polymeric systems: A review. *Journal of Polymer Research*, *25*(11), 232. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1636-x>
- Priyanka, S., S, K. R. N., R. s., A. B., & John, A. (2023). Biocompatible green technology principles for the fabrication of food packaging material with noteworthy mechanical and antimicrobial properties—A sustainable developmental goal towards the effective, safe food preservation strategy. *Chemosphere*, *336*, 139240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139240>
- Rivadeneira-Velasco, K. E., Utreras-Silva, C. A., Díaz-Barrios, A., Sommer-Márquez, A. E., Tafur, J. P., & Michell, R. M. (2021). Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch: A Review. *Polymers*, *13*(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/polym13193227>
- Shaikh, S., Yaqoob, M., & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*, *4*, 503-520. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>
- Siracusa, V. (2012). Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. *International Journal of Polymer Science*, *2012*, e302029. <https://doi.org/10.1155/2012/302029>
- Siracusa, V., Genovese, L., Ingrao, C., Munari, A., & Lotti, N. (2018). Barrier Properties of Poly(Propylene

- Cyclohexanedicarboxylate) Random Eco-Friendly Copolyesters. *Polymers*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/polym10050502>
- Sothornvit, R. (2019). Nanostructured materials for food packaging systems: New functional properties. *Current Opinion in Food Science*, 25, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.001>
- Tariq, A., Afzal, A., Rashid, I. A., & Shakir, M. F. (2020). Study of thermal, morphological, barrier and viscoelastic properties of PP grafted with maleic anhydride (PP-g-MAH) and PET blends. *Journal of Polymer Research*, 27(10), 309. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02291-2>
- Tuárez-Párraga, M. A., Laz-Mero, M., Castillo-Gorozabel, V., & Córdova-Mosquera, A. (2022a). Producción de empaques en polipropileno mediante inyección con colada fría y colada caliente. *Avances En Química*, 17(3), Article 3.
- Tuárez-Párraga, M. A., Laz-Mero, M., Córdova-Mosquera, R. A., & Conforme-Montesdeoca, J. V. (2022b). Migración química desde envases fabricados con polipropileno hacia alimentos grasos. *Revista ESPAMCIENCIA*, 13(1), Article 1. [https://doi.org/10.51260/revista\\_espamciencia.v13i1.286](https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v13i1.286)
- Van Bree, I., De Meulenaer, B., Samapundo, S., Vermeulen, A., Ragaert, P., Maes, K. C., De Baets, B., & Devlieghere, F. (2010). Predicting the headspace oxygen level due to oxygen permeation across multilayer polymer packaging materials: A practical software simulation tool. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(3), 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.007>
- Villa, C. C., Valencia, G. A., López Córdoba, A., Ortega-Toro, R., Ahmed, S., & Gutiérrez, T. J. (2022). Zeolites for food applications: A review. *Food Bioscience*, 46, 101577. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101577>
- Williams, H., Lindström, A., Trischler, J., Wikström, F., & Rowe, Z. (2020). Avoiding food becoming waste in households – The role of packaging in consumers' practices across different food categories. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121775>
- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>
- Xiao, Z., Li, L., Zhou, D., Xue, G., Yuan, Z., & Dai, Q. (2003). Isothermal crystallization of low ethylene content polypropylene random copolymer recovered from decalin and n-hexadecane. *Thermochimica Acta*, 404(1), 283-288. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00186-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00186-2)
- Xie, L.-G., Zhao, X., Dou, S.-H., Tang, L., & Sun, H.-M. (2019). A new standard reference film for oxygen gas transmission measurements. *Royal Society Open Science*, 6(4), 190142. <https://doi.org/10.1098/rsos.190142>
- Zabihzadeh Khajavi, M., Ebrahimi, A., Yousefi, M., Ahmadi, S., Farhoodi, M., Mirza Alizadeh, A., & Taslikh, M. (2020). Strategies for Producing Improved Oxygen Barrier Materials Appropriate for the Food Packaging Sector. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 346-363. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09235-y>
- Zarshad, S., Naghib, S. M., Zare, Y., & Rhee, K. Y. (2022). A simple model for gas barrier performance of polymer nanocomposites considering filler alignment angle and diffusion direction. *Composites Science and Technology*, 230, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109397>
- Zhong, Z., Peng, L., Zhang, N., Su, J., Ye, N., Luo, Z., Han, C. C., Huang, X., & Su, Z. (2022). Miscibility of isotactic polypropylene with random and block ethylene-octene copolymers studied by atomic force microscopy-infrared. *Polymer*, 259, 125354. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125354>
- Zubair, M., & Ullah, A. (2019). Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(3), 406-434. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1534800>

## BIOGRAFÍAS



**Miguel, Tuárez-Párraga**, Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de productos y proceso de la Industria Alimentaria (Universidad Nacional de Cuyo - Argentina). Ingeniero Industrial y magister en Agroindustria. Investigador Acreditado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENECYT) REG-INV-22-05555. Especialista en diseño y desarrollo de empaques. Ponente en seminarios nacionales e internacionales. Autor y revisor de artículos científicos.



**Mabel, Laz-Mero**, Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de productos y proceso de la Industria Alimentaria (Universidad Nacional de Cuyo - Argentina). Ingeniera Química, magister en Agroindustria. Docente tiempo completo en la Universidad Técnica de Manabí. Emprendedora e Investigador (Investigador Acreditado - REG-INV-22-05557).



**Alexandra, Córdova-Mosquera,** Profesional en Ingeniería Química graduada en la Universidad de Guayaquil; Magister en Administración Ambiental; Doctora en ciencias; docente principal y directora fundadora de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Manabí.



**Ramona, Panchana-Cedeño,** Ingeniera Civil, Magíster Scientiarum en Energía, Docente Principal Tiempo Completo Departamento de Construcciones Civiles, de la Universidad Técnica de Manabí. Actualmente es Decana de la Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas, Universidad Técnica










**Pablo, Gavilanes-López,** Ingeniero en alimentos con experiencia en el área de tecnología de alimentos lácteos y cárnicos. Actualmente es docente tiempo completo en la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López", ESPAM MFL.



**Liceth, Solórzano Zambrano,** Doctora en Ciencias Agrarias Alimentarias y Agroambientales (Universidad de Pisa, Italia); Mg. en Calidad y Seguridad Alimentaria; Ingeniera en Agroindustrias. Profesor Titular del Departamento de Procesos Agroindustriales de la Universidad Técnica de Manabí; Investigador del Departamento de Procesos Agroindustriales de la Universidad Técnica de Manabí. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6964-0696>.



# Reducción del Impacto Ambiental con Desechos Industriales en Pavimentos por Análisis del California Bearing Ratio

Torres-Hoyer, Roberto<sup>1,2\*</sup> ; Peña, Jackeline<sup>1</sup> ; Millalén, Fernanda<sup>1</sup> ; Picón, Ricardo<sup>1,3</sup> ;  
Barreto, Wilmer<sup>1,3</sup> ; Peña, Oswaldo<sup>1,4</sup> ; Torres-Hoyer, Jesús<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Temuco, Chile

<sup>2</sup>Universidad de Los Andes, Grupo de Investigación de Geología Aplicada, GIGA, Mérida, Venezuela

<sup>3</sup>Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Departamento de Estructuras, Barquisimeto, Venezuela

<sup>4</sup>Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo, Facultad de Ingeniería, Trujillo, Venezuela

**Resumen:** La sub-base del pavimento requiere materiales adecuados para el soporte necesario. Tradicionalmente, se ha utilizado material de préstamo, lo que genera un impacto ambiental. Este estudio analizó el potencial de reutilizar cenizas de desecho industrial depositadas en vertederos. Se realizaron ensayos de laboratorio mezclando el suelo con diferentes proporciones de cenizas. Se determinó la relación entre humedad y peso seco del suelo, se realizó el ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio) y se calculó el espesor de pavimentos, con un mismo espesor de sub-base. A medida que aumenta el porcentaje de cenizas, la calidad del suelo disminuye, pero sigue cumpliendo los requisitos para ser utilizado como sub-base. Se recomienda considerar las cenizas de desecho industrial como un material de reciclaje viable en la construcción de pavimentos, lo que reduciría el impacto ambiental asociado a su disposición en vertederos.

**Palabras clave:** Economía Circular, Reciclado, Pavimentos, Base, Proctor

## Environmental Impact Reduction with Industrial Waste in Pavements by California Bearing Ratio Analysis

**Abstract:** The pavement sub-base requires suitable materials for the necessary support. Traditionally, borrow material has been used, this generates environmental impact. This study analyzed the potential for reusing industrial waste ashes deposited in landfills. Laboratory tests were conducted by mixing the soil with different proportions of ashes. The relationship between soil moisture and dry weight was determined, and the C.B.R. (California Bearing Ratio) test was performed. The pavement thickness was calculated, keeping the same sub-base thickness. As the percentage of ashes increased, the soil quality decreased, but it still met the requirements for use as a sub-base. It is recommended to consider industrial waste ashes as a viable recycling material in pavement construction, which would reduce the environmental impact associated with their disposal in landfills.

**Keywords:** Circular Economy, Recycling, Pavements, Base, Proctor

### 1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de Naciones Unidas de acuerdo a la exposición de motivo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (O.D.S.), se tiene que la mitad de la humanidad, 3500 millones de personas, vive hoy en día en las ciudades y se prevé que esta cifra aumentará a 5000 millones para el año 2030.

Por otra parte, se espera un 95 % de expansión de los terrenos urbanos en las próximas décadas en el mundo en desarrollo.

Actualmente, 883 millones de personas viven en barrios marginales y la mayoría se encuentran en Asia oriental y sudoriental (Ganesan y Rajendra, 2018).

Parte esencial es la rápida urbanización que está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública. De aquí al 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, es preponderante, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo (Chandra et al., 2019). De igual manera, se debería proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros,

\*rtorres@uct.cl

Recibido: 19/09/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.04

CC 4.0

asequibles, accesibles y sostenibles para todos para mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, y prestar especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y adultos mayores. También es cierto que existe una demanda cada vez mayor de recursos naturales escasos, lo cual representa uno de los principales desafíos que tiene la industria global de pavimentos asfálticos en la construcción y mantenimiento de los mismos a nivel mundial (Lingyun et al., 2022).

El proceso de diseño, junto con los materiales, son parte esencial para la duración de un pavimento. Resulta fundamental mantener los caminos pavimentados en buenas condiciones, acordes al tránsito vehicular y sin complicaciones para los conductores. Cuando un camino no está en óptimas condiciones para ser transitado, se generan retrasos en las rutas o accidentes vehiculares, aumentando la polución y generación de gases de efecto invernadero, lo cual provoca una mala calidad de vida para las personas que viven y transitan por el lugar. Pero también es cierto que es importante disminuir el impacto del ser humano, tanto en sus actividades del día a día, como en la construcción para beneficio propio, que genera al medio ambiente.

Se comprende que, con el tiempo y el tránsito diario en un pavimento, se generan considerables daños. La falla más común es la formación de baches y grietas en el camino, pequeños desniveles producidos por hundimiento o pérdida de la capa superficial, lo que se debe principalmente al descenso del suelo bajo el pavimento, que generalmente se debe a la mala compactación de las capas que se encuentran bajo la capa de asfalto, o bien a la calidad del material granular empleado para soportar el pavimento, donde a pesar de ser incómodo para el conductor pasar por uno de ellos, provoca que el pavimento siga en descenso si no es arreglado.

Existen normativas que regulan las propiedades mecánicas que debe tener el suelo para ser utilizado como sub-base como las del MOP (2008), la presente investigación se enfocará en desarrollar mejoras a un material granular que se pretende utilizar para este fin, como lo indica Pradeep et al. (2018) que propone el uso de materiales reciclados en diversas capas del pavimento, subrayando su eficiencia en la gestión de residuos, reducción de costos y demanda de materiales convencionales, así como, en los Emiratos Árabes Unidos (EAU), están evaluando la reutilización de estos materiales en lugar de arrojarlos a vertederos (Abu-Abdo y Jung, 2019).

La ceniza es un material generado por las empresas forestales, luego de la combustión de sus calderas, se forma una ceniza oscura y fina, la cual es, en su mayoría, desechada en vertederos, En la actualidad, se han realizado estudios a la ceniza como aditivo en hormigones (Barra, 2019) donde se ha observado que la ceniza presenta expansión al hidratarse, lo que podría favorecer su uso como posible material de mejoramiento de suelos, y así aumentar su resistencia, con la compactación, y generar que el pavimento tenga mayor vida útil.

Para mejorar el suelo bajo un pavimento (sub-base), se debe lograr que éste cumpla con lo establecido en el manual de carreteras de Chile, MOP (2008). Para esto, se mezcló un suelo control obtenido de un pozo lastre de la comuna de Pitrufuquén, con un material de desecho (cenizas) de la Forestal Andes. La ceniza se caracteriza por su contenido de cal y alto contenido de sílice, que normalmente se utilizan para estabilizar el suelo.

## 2. ANTECEDENTES

Santos et al. (2012) define que la ceniza volante tiene el potencial de ser utilizada de manera beneficiosa en la construcción de carreteras, incluyendo terraplenes y capas estructurales del pavimento, como capas base/sub-base, hombros, concreto asfáltico y concreto de cemento Portland, con el fin de crear una infraestructura más duradera y sostenible. El artículo describe un estudio sobre la optimización de la mezcla de suelo y ceniza volante para la construcción de terraplenes en carreteras. La ceniza volante fue recolectada de una planta de energía en Mississippi. Se realizaron pruebas en suelos y mezclas de ceniza volante y suelo preparadas con el contenido óptimo de agua, incluyendo compactación, permeabilidad y resistencia a la compresión no confinada (qu). La adición de ceniza volante al suelo resultó en aumentos apreciables en la qu del suelo inorgánico. Después de 14 días de curado, la qu de las muestras compactadas a partir de las mezclas de ceniza volante/suelo osciló entre 900 kN/m<sup>2</sup> y 9300 kN/m<sup>2</sup>, mientras que el suelo solo tenía una carga última de 1 a 200 kN/m<sup>2</sup>. Se discutió el efecto de la relación de mezcla y el contenido de agua de compactación en las propiedades geotécnicas de las mezclas de ceniza volante/suelo.

Huan et al. (2022), concluyen que, entre las seis técnicas de gestión de residuos plásticos analizadas (vertederos, reciclaje, pirólisis, licuefacción, construcción de carreteras y producción de alquitrán y concreto), la construcción de carreteras y la producción de alquitrán y concreto son las dos estrategias más efectivas. Esto se debe a beneficios significativos como la facilidad de localización, la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de la durabilidad y sostenibilidad de los materiales fabricados, las estructuras y las carreteras.

Yaghoubi et al. (2017) mezcló áridos con plásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) y realizó una variedad de pruebas geotécnicas, como la relación de carga de California (CBR).

Elshaboury et al. (2021) discute sobre el tratamiento de los residuos de construcción y demolición, y examina sistemáticamente la literatura de investigación sobre la gestión de residuos utilizando un enfoque de mapeo científico. El estudio utiliza análisis bibliométricos y cientométricos para identificar las revistas, autores, publicaciones, palabras clave y países más relevantes en este campo y determinar temas emergentes de investigación como estimación y cuantificación, análisis y evaluación integral, impactos ambientales, pruebas de rendimiento y comportamiento, plan de gestión, prácticas de desvío y tecnologías emergentes. Para analizar las brechas en la investigación y proponer un marco

para futuros estudios, se realizó un análisis cualitativo en profundidad. Este estudio sirve como una referencia multidisciplinaria para investigadores y profesionales, ayudándoles a relacionar las áreas de estudio actuales con las tendencias futuras al presentar una visión general de las últimas investigaciones en este campo.

Ganasen et al. (2023) destaca la importancia de encontrar formas innovadoras de utilizar los residuos agrícolas, no solo como sustitutos de materiales convencionales, sino también como materiales de refuerzo.

Esto muestra el potencial para transformar los desechos en recursos útiles, lo que puede conducir a la creación de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción. Este enfoque nos muestra aspectos prometedores para abordar los desafíos actuales de sostenibilidad y gestión de residuos de igual forma pueden contribuir a la reducción de residuos, la conservación de recursos naturales y la creación de infraestructuras más sostenibles en el futuro.

### 3. METODOLOGÍA

En este apartado, se da a conocer la metodología empleada que consiste en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o causa que produce una situación o acontecimiento particular. El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas (Arena, 1993). De acuerdo con Arena (1993), se le asignó a la ceniza como el parámetro variable dentro de la investigación y se verificaron los resultados con relación al valor control, que sería suelo sin ceniza ya que no hay estudios que comprueben que la ceniza de forestal ayuda al mejoramiento de suelo y los resultados eran inciertos.

Es importante recalcar que cada país tiene normas y especificaciones para un material a utilizar en la construcción de pavimentos. Cualquier material reciclado que se utilice para fines de construcción debe someterse a pruebas de propiedades similares a las del material convencional (Pradeep et al., 2018).

Por consiguiente, para investigar el potencial beneficio de la ceniza en la mejora del suelo, se realizó el ensayo de laboratorio California Bearing Ratio (C.B.R.) (índice de soporte californiano), que permite medir la capacidad de soporte del suelo. La variable de estudio fue el porcentaje de ceniza incorporado al suelo, pero para ello se debe establecer el suelo control en conformidad a las normativas ASTM, al INN (2008) y INN (1981) pertinentes, entre las cuales se pueden mencionar:

ASTM D2487: norma que establece el procedimiento para la clasificación de suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

ASTM D3282: Esta norma proporciona pautas para la clasificación de suelos y mezclas de suelo-árido utilizados en la construcción de carreteras.

ASTM D4318: norma que describe los métodos de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

ASTM D6913: Esta norma detalla el método de análisis por tamizado para determinar la distribución de tamaños de partículas de suelos.

ASTM D1883: La norma que explica detalladamente el ensayo de California Bearing Ratio, para suelos compactados.

ASTM D1557: Métodos estándar para pruebas de laboratorio en compactación de suelo usando el método modificado de Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> or 2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)

El análisis comenzó con la definición de porcentaje de ceniza a utilizar en las muestras de ensayo, y así se estableció una varianza entre puntos de 0 %, 2 % 4 % 6 % y 8 %, lo cual facilitó su análisis. Posteriormente, se mezclaron las muestras y se llevaron a cabo ensayos de laboratorio de proctor y California Bearing Ratio (C.B.R.) Con los valores obtenidos, se procede a constatar los datos obtenidos, así como el impacto de los resultados y lo que éstos representan para la investigación.

### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar, se inicia con la clasificación de la Base o suelo control por medio de la clasificación según la SUCS y la AASHTO descritas en MOP (2008), donde se utilizaron los resultados obtenidos en la granulometría y en los límites de consistencia.

De acuerdo con la granulometría (Tabla 1), se observó que el material que pasa por el tamiz N° 200 es inferior a 35 %, por lo tanto, con ese valor se define granular y de acuerdo con Clasificación De Suelos AASHTO, y en función del IG de 0 en función de lo obtenido en el laboratorio del como LL clasificando el suelo control como un A-1-a (0).

Tabla 1. Granulometría Suelo Control

Tamiz	mm	Retenido (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pasa
3"	80	0	0.0	0.0	100.0
2 1/2 "	63	0	0.0	0.0	100.0
2"	50	0	0.0	0.0	100.0
1 1/2 "	40	0	0.0	0.0	100.0
1"	25	1 617	7.6	7.6	92.4
3/4"	20	978	4.6	12.3	87.7
3/8"	10	2 929	13.9	26.1	73.9
N° 4	5	2 428	11.5	37.6	62.4
N° 10	2	2 642	12.5	50.1	49.9
N° 40	0.5	8 309	39.3	89.4	10.6
N° 200	0.08	1 881	8.9	98.3	1.7
Base		359	1.7	100.0	0
Total		21 143	100.0		

Luego se decidió realizar la clasificación por el método SUCS. En primer lugar, el resultado de la granulometría, tenemos que se observa el porcentaje de material que pasa por el tamiz N° 200 es inferior a 50 % por lo tanto se trata de un suelo grueso, por el tamiz N° 4 pasa una cantidad superior al 50 %, por ende, se trata de arenas, y como la parte fina del material es inferior a 5 % se debe calcular los coeficientes de acuerdo con la Tabla

2, donde los valores de  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  y  $d_{60}$  se calcularon por la interpolación de los valores en la Tabla 1 y se obtiene:

**Tabla 2.** Clasificación S.U.C.S. Coeficientes

$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	Cu	Cc
0.47	1.24	4.43	9.38	0.74

Con los valores se clasifica el suelo según el método SUCS la clasificación del suelo es SP (Arena pobremente gradada).

Granulometría

4.1 Ensayo de Proctor Modificado ASTM D1557

Se lo utiliza para obtener la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo de un suelo en condiciones de compactación controladas. En la Tabla 3 se tienen los valores calculados al realizar el ensayo proctor modificado a las muestras de suelo con y sin cenizas (en función a su porcentaje), la humedad y densidad.

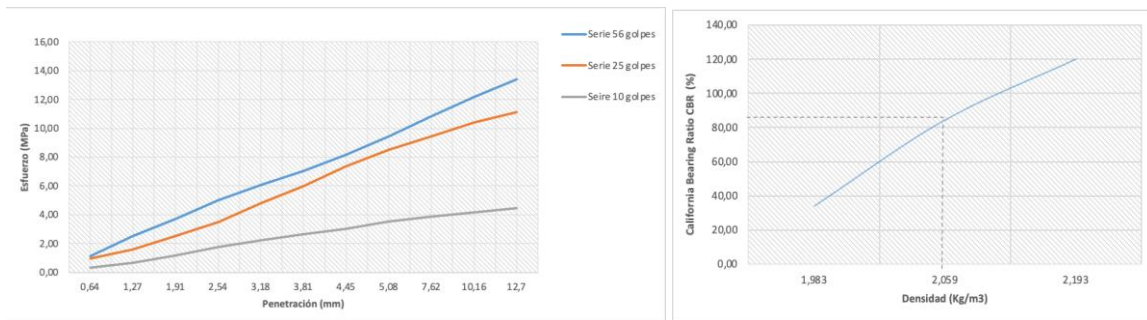
**Tabla 3.** Resultados ensayo proctor modificado

Cenizas en el Suelo (%)	Humedad óptima (%)	Densidad Maxima Seca ( $g/cm^3$ )
0	8.0	2.163
2	9.1	2.132
4	9.3	2.111
6	9.5	2.067
8	9.7	2.050

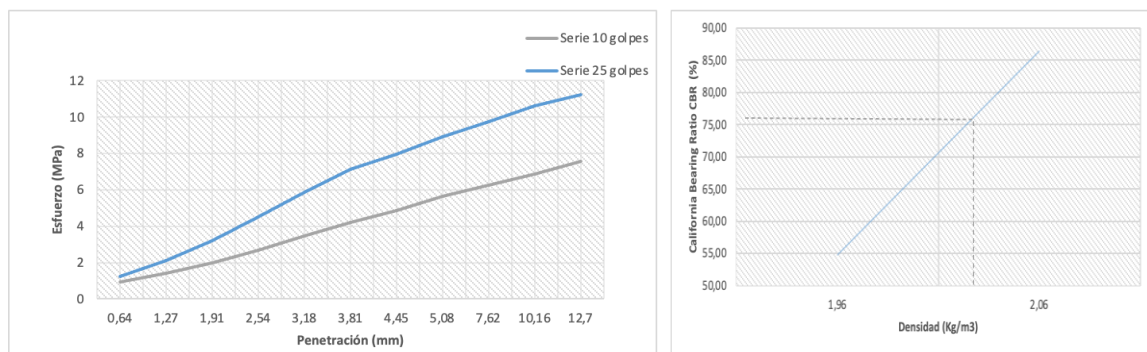
4.2 Ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) ASTM D1883

Para realizar el ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) se utilizó el Manual de carreteras de Chile Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control del MOP (2008) y la norma NCh1852 Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio según INN (1981). En la Figura 1 se pueden observar las gráficas correspondientes al ensayo del California Bearing Ratio (C.B.R.) de un suelo control.

Así mismo, en las Figuras 2, 3, 4 y 5 se pueden apreciar las gráficas del California Bearing Ratio (C.B.R.) con porcentaje adicionado del 2 %, 4 %, 6 % y 8 % respectivamente.



**Figura 1.** Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (gris) 25 golpes (naranja) 56 golpes (azul) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo sin cenizas



**Figura 2.** Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 2 % cenizas. En este caso, la serie de 56 golpes presenta un comportamiento anómalo y no se graficó, ya que la densidad máxima seca compactada al 95 % se encuentra entre la serie de 10 a 25 golpes

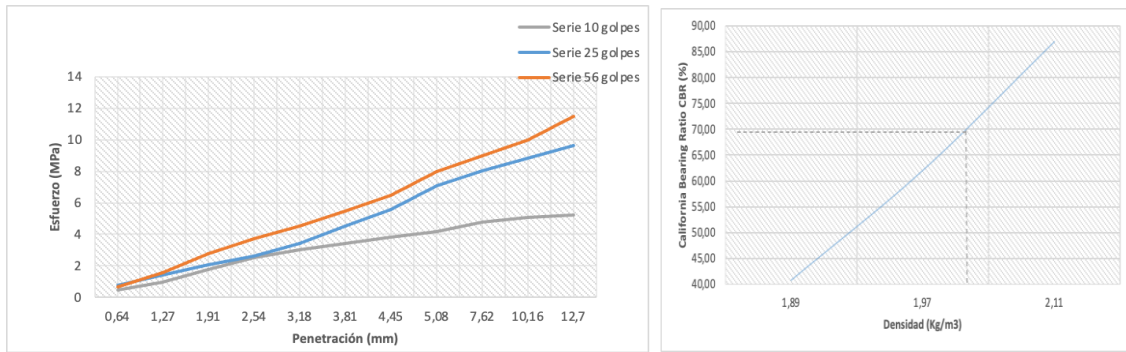


Figura 3. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 4 % cenizas

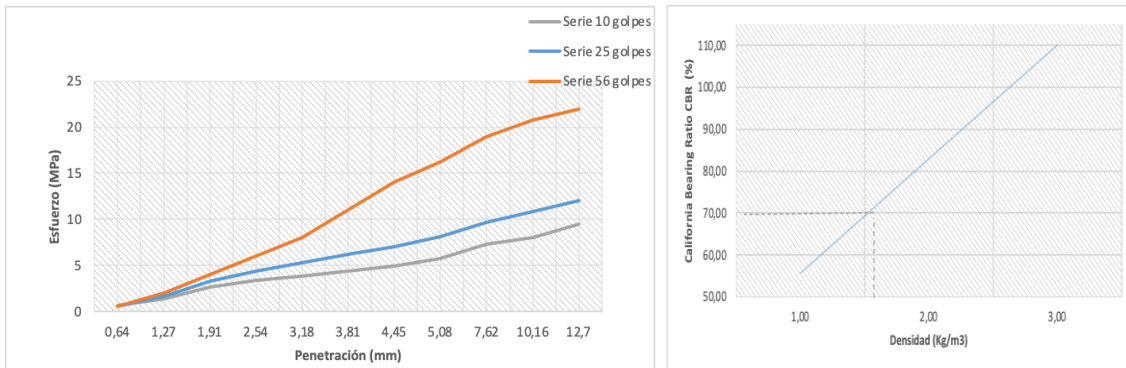


Figura 4. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 6 % cenizas

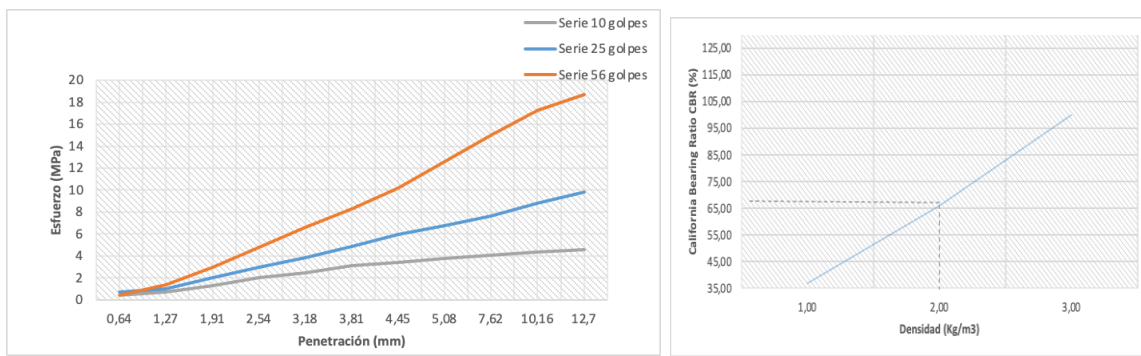


Figura 5. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica CBR suelo 8 % cenizas

Con los resultados del California Bearing Ratio (C.B.R.) se realizó una gráfica California Bearing Ratio (C.B.R.)/porcentaje de ceniza, como se muestra en la Figura 6 donde se observa la tendencia que tuvo el suelo, desde el punto control sin cenizas hasta tener un 8 % de estas. El resultado del ensayo de California Bearing Ratio (C.B.R.) del suelo fue disminuyendo cada vez que se le adiciona ceniza hasta un punto de un posible equilibrio, esto destaca que el material seguía cumpliendo con las solicitudes exigidas por la norma para ser utilizado como sub-base, con la particularidad que se establece un punto de inflexión asociada a la cantidad de agua que puede absorber las cenizas, lo cual genera debate sobre la calidad o no de la sub-base.

Con las ecuaciones básicas de diseño establecidas en el Manual de carreteras de Chile, Volumen 8, se pudo calcular los espesores de pavimento rígido (MOP, 2008), en función de los resultados de California Bearing Ratio (C.B.R.) y con las demás variables independientes iguales,

considerando una longitud de losa de 4 metros y un mismo espesor de base de 240 mm.

Para analizar el impacto de la disminución del (C.B.R.) en función a la adición de cenizas, se presenta la Tabla 4.

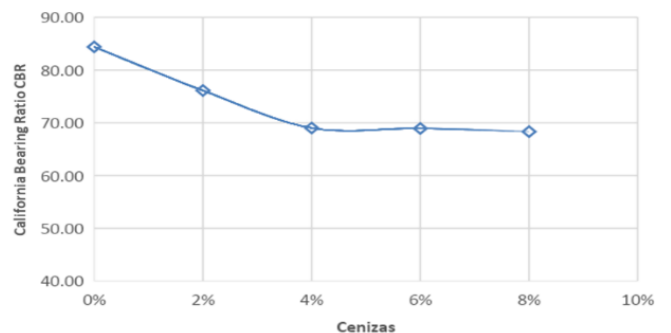


Figura 6. Relación California Bearing Ratio C.B.R. / % de cenizas

La variación del porcentaje de California Bearing Ratio (C.B.R.) de un ensayo a otro fue representativa porcentualmente, pero al momento de analizar la variación de los espesores de pavimentos da una diferencia de 2 mm, tal como se muestra en la Tabla 4. Por otra parte, la ceniza no aportó a la resistencia, lo que la convierte en un material inerte interesante para ser reutilizado como parte del árido. De acuerdo con los resultados, con el porcentaje de cenizas 2 %, 4 %, 6 % y 8 % el suelo sigue cumpliendo con lo establecido en el Manual de Carreteras de Chile, que exige un California Bearing Ratio (C.B.R.) superior o igual a 40 %, por lo tanto, es un material que se puede utilizar, como árido en capas base/subbase, tal como lo señala Yaghoubi et al. (2017).

**Tabla 4.** Resultados ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) y espesor de Pavimento

Cenizas (%)	Humedad óptima (%)	Expansión (%)	Densidad máxima seca (Proctor 95%) (Kg/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	Espesor pavimento (mm)
0	8.0	0.0	2.059	84	204
2	9.1	0.0	2.026	76	205
4	9.3	0.0	2.006	69	206
6	9.5	0.0	1.963	69	206
8	9.7	0.0	1.946	68	206

## 5. CONCLUSIONES

Este estudio destaca la importancia de la economía circular en el campo de la construcción de pavimentos. La investigación demuestra que la utilización de cenizas de desecho industrial en lugar de desecharlo en vertederos puede contribuir a la economía circular.

Al aprovechar las cenizas de desecho industrial y utilizarlas como material en la construcción de pavimentos, se logra cerrar el ciclo de vida de estos residuos. En lugar de considerarlos como un problema de disposición y generadores de costos, se les da un nuevo propósito y se les agrega valor al convertirlos en un recurso útil, ya que la densidad máxima y el valor de California Bearing Ratio (C.B.R.) disminuyeron conforme se aumentaba el porcentaje de cenizas, pero la gráfica muestra que, la adición parece tener un efecto menor y se estabiliza sobre lo exigido por la normativa vigente.

El estudio muestra el potencial para transformar los desechos en recursos, lo que puede conducir a la creación de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción. Este enfoque muestra aspectos prometedores para abordar los desafíos actuales de sostenibilidad y gestión de residuos. De esta forma se contribuye a la reducción de residuos, la conservación de recursos naturales y la creación de infraestructuras más sostenibles en el futuro, cumpliendo la normativa vigente y las solicitudes necesarias para el uso correcto de la vialidad a diseñar.

Se resalta, además, la posibilidad de reciclar desechos industriales, en particular cenizas en la construcción de pavimentos. Si bien el Manual de carreteras de Chile no establece valores específicos para el ensayo Proctor, se tomó precaución para asegurar que el suelo, con sus distintos contenidos de humedad, formara la típica curva parabólica característica del ensayo.

Al utilizar las cenizas como un sustituto de los materiales tradicionales, se puede reducir la dependencia de recursos naturales limitados y costosos, como los agregados y el cemento. Esto puede tener un impacto positivo en los costos de construcción, al tiempo que se promueve la sostenibilidad y se reduce el impacto ambiental.

Es importante destacar que la ceniza, al ser un material aparentemente fino, no se mezcló adecuadamente con el agua. Como resultado, el tiempo necesario para agitar la muestra fue mayor en comparación con el suelo sin cenizas. Durante los ensayos, se observó que el suelo presentaba un grado de sequedad inicial, pero a medida que se incrementa la cantidad de agua, se saturaba rápidamente. En algunos casos, fue necesario realizar más de 5 muestras, ya que solo con un pequeño incremento en el contenido de agua, la muestra lograba la saturación. Por lo tanto, se trabajó con valores de humedad más precisos, utilizando decimales en lugar de números enteros, punto a tener en consideración para nuevos estudios y análisis en campo.

También se observó que, al golpear el suelo mezclado con ceniza, expulsaba agua debajo del molde de Proctor, incluso cuando la muestra no estaba saturada. Esto provocó que la ceniza se compactara fácilmente, pero debe ser motivo de nuevos estudios, analizar la relación de vacíos presente en suelos con cenizas de éste tipo.

Sin embargo, se esperaba que a medida que aumentaba el porcentaje de cenizas, el contenido de humedad también aumentara. Esto no ocurrió, ya que la ceniza no se comportó como un "suelo fino" y absorbía agua, que fácilmente la expulsaba, por lo que no presentaba límite líquido. Los resultados mostraron que la densidad disminuye gradualmente, lo que indica que la ceniza generaba un suelo con mayor relación de vacíos y una buena capacidad de drenaje, habilidades importantes para un suelo de sub-base.

Los moldes utilizados en los ensayos se mantuvieron prácticamente iguales antes y después de ser sumergidos en agua. De esto se deduce que la compactación de los moldes fue adecuada y el suelo resultante tiene capacidad de drenaje.

## 6. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la utilización de cenizas de desecho industrial en la construcción de pavimentos. Es importante seguir explorando y refinando estos métodos de reciclaje de materiales para lograr una infraestructura más sostenible y

reducir el impacto ambiental de la industria, de igual manera se debe ahondar respecto al comportamiento de la ceniza ante la presencia de agua.

Se recomienda llevar a cabo los ensayos realizados en este estudio para determinar hasta qué porcentaje de ceniza se mantiene el valor del California Bearing Ratio (C.B.R.) dentro del límite establecido por las Normativas Vigentes. Esto permitirá verificar si la mezcla de ceniza con el suelo sigue siendo un material adecuado para ser utilizado como sub-base en pavimentos. Además, se invita a continuar el análisis del suelo sin ceniza y con ceniza mediante otros ensayos especificados en los Manuales de Carreteras, con el fin de confirmar la idoneidad tanto del suelo como de la ceniza como materiales reciclados en sub-bases u otras áreas de la ingeniería.

Además, se recomienda llevar a cabo un estudio sobre el costo asociado con el reciclado de cenizas. Al mezclar la ceniza con el suelo, se requeriría una menor cantidad de material granular, y la ceniza es un material abundante que se proporciona de forma gratuita, al menos por la empresa forestal Andes. Por lo tanto, se sugiere analizar esta situación para evaluar la viabilidad económica de utilizar cenizas como material reciclado en la construcción de sub-bases.

Es necesario saber que cada diseño de pavimento es único y dependerá de la estructura completa, que incluye a la rasante, y que no se puede recomendar un porcentaje único de cenizas. Es cierto que el CBR disminuye a medida que aumenta el porcentaje de cenizas por lo que el porcentaje a utilizar, dependerá del criterio del diseñador y de cuanto está dispuesto a asumir en la disminución del CBR de la Base o Subbase.

Estas recomendaciones buscan promover una mayor investigación y aplicación del reciclado de desechos industriales, específicamente la ceniza, en la ingeniería civil. Al continuar explorando las propiedades y beneficios de estos materiales reciclados, se puede avanzar hacia prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente en la construcción de infraestructuras viales y en otros proyectos de ingeniería.

Se recomienda realizar una modelación con elementos finitos como la implementada por Chaparro y Pradena (2019), la cual analiza el estado tensional de losas cortas bajo solicitaciones de pisos industriales para generar recomendaciones de diseño, y corroborar el diseño de los espesores en función de las solicitudes por el paso vehicular. Por otro lado, se debe analizar el impacto que tiene la ceniza a la granulometría, ya que, si bien cumple la norma, es importante analizar la variabilidad de los porcentajes asignados al comportamiento de la Base o Subbase.

## REFERENCIAS

- Abu-Abdo, A. & Jung, S. (2019). Investigation of reinforcing flexible pavements with waste plastic fibers in Ras Al Khaimah, UAE. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1753 – 1762. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1566086>
- Arena, Z. (1993). *Introducción a la metodología de la investigación*. México DF, México. Editorial Cal y Arena.
- Barra, D. (2019). *Estudio de la resistencia mecánica de diferentes mezclas de hormigón H25 con adición de un material de reemplazo obtenido de un desecho de biomasa*. [Proyecto de Título Universidad Católica de Temuco].
- Chandra, S., Ravi, A., Bindhu-Abraham, K. & John, A. (2019). Utilization of Industrial Wastes in Road Construction: A Review; *International Journal of Emerging Technologies and Innovate Research*, 6(3), 197-201. <https://www.jetir.org/papers/JETIR1903133.pdf>
- Chaparro, B. & Pradena, M. (2019). Análisis estructural de pavimentos de hormigón: Losas cortas en pisos industriales. *Revista Politécnica*, 43(2), 45–50. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.989>
- Elshaboury, N., Al-Sakkaf, A., Mohammed, E. & Alfalah, G. (2021). Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis. *Resources Conservation and Recycling* 173(11):105745 <https://doi.org/10.3390/ijerph19084496>
- Ganesan, A. & Rajendra, S. (2018). Recycling of industrial wastes for road construction: A review. *Construction and Building Materials*, 172, 358-371.
- Ganasen, N., Bahrami, A. & Loganathan, K. (2023) A Scientometric Analysis Review on Agricultural Wastes Used as Building Materials. *Buildings*, 13, 426. <https://doi.org/10.3390/buildings13020426>
- Huan, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Ivanovich, N., Mustafa, A., Farouk, A. & Mehmood, I. (2022). Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(8), 4556. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- Instituto Nacional de Normalización. (1981). *Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio*. NCh 1852. Chile
- Instituto Nacional de Normalización. (2008). *Mecánica de suelos – Relaciones humedad/densidad –Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 457 mm de caída*. NCh 1543/2. Chile
- Lingyun, Y., Zhengwu, L., Zhanping, Y., Dongdong, G., Xu, Y, Fu Xu, Mohammad, H. & Aboelkasim, D., (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and*

*Transportation Engineering*, 9(5), 742-764,  
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>

- MOP. (2008). *Manual de Carreteras, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Volumen N°8. Chile.
- Pradeep, G., Pawan, K., Ajay, J., Rahul, A. & Harshwardhan, S. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 180, 239 – 253.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067>.
- Santos, F., Li, L., Li, Y., Shao, W., Zhao, Q. & Amini, F. (2012) Evaluation of Fly Ash and Soil Mixtures for Use in Highway Embankments. *GeoCongress*.  
<https://doi.org/10.1061/9780784412121.376>
- Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Wong, C. & Horpibulsuk, S. (2017) Stiffness Properties of Recycled Concrete Aggregate with Polyethylene Plastic Granules in Unbound Pavement Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4)  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001821)



**Millalén, Fernanda,** Ingeniera Civil en Obras Civiles Universidad Católica de Temuco.



**Picón, Ricardo,** Ingeniero Civil Instituto Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales, Caracas, Venezuela. Doctor en Ciencias de Aplicadas, Académico de las Universidades Lisandro Alvarado (Venezuela) Profesor Titular y Universidad Católica de Temuco (Chile) Profesor Asociado.

## BIOGRAFÍAS

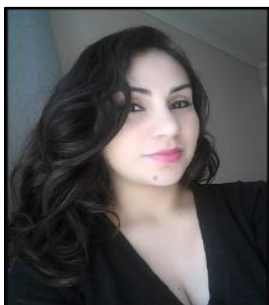


**Torres-Hoyer, Roberto,** Ingeniero Geólogo ULA - Venezuela y M.Sc. en Ingeniería Vial, ULA - Venezuela Profesor Adjunto Universidad Católica de Temuco, Director de Relaciones Internacionales y Jefe de Carrera de Ingeniería Civil en Obras Civiles UCT-Chile y Director de Escuela

de Ingeniería Geológica ULA-Venezuela, Jefe de Proyectos del IVT.



**Barreto, Wilmer,** Ingeniero Civil Universidad “Lisandro Alvarado” Barquisimeto, Venezuela. M.Sc. en Hidroinformática (UNESCO-IHE, Países Bajos). Doctor Universidad Tecnológica de Delft Países Bajos. Académico de las Universidades Lisandro Alvarado (Venezuela) y Universidad Católica de Temuco (Chile).



**Peña, Jackeline,** Ingeniera Geóloga ULA -Venezuela M.Sc. en Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras Mención Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos CIDIAT-ULA-Venezuela, Planta Adjunta, Universidad Católica de Temuco, Chile.



**Peña Oswaldo,** Ingeniero Civil ULA – Venezuela, M.Sc. en Obras Hidráulicas ULA – Venezuela Dr. en Ciencias Gerenciales URBE - Venezuela Profesor Agregado Universidad Politécnica Territorial de Trujillo Venezuela. Profesor UCT, Chile y Universidad Santo Tomás, Chile








**Torres-Hoyer, Jesús,**  
Ingeniero Geólogo ULA -  
Venezuela M.Sc. en  
Matemáticas Aplicadas a la  
Ingeniería - ULA, Director  
de Calidad en Docencia  
UCT-Chile, Jefe de Carrera  
de Ingeniería Civil  
Geológica, Jefe de Carrera  
de Geología, UCT Chile y  
Director de Escuela de

Ingeniería Geológica ULA Venezuela.



# Análisis de las Antenas Microcinta para Cosecha de Energía Electromagnética Radiada

Zapata-Ochoa, Edison-Andres<sup>1</sup> ; López-Giraldo, Francisco-Eugenio<sup>2</sup> ; García-Pineda, Vanessa<sup>3,\*</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Instituto Tecnológico Metropolitano, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Medellín, Colombia

**Resumen:** En este documento, se realiza una revisión de las antenas de microcinta utilizadas en sistemas de transferencia y captación de energía electromagnética radiada en las bandas de microondas, en función de sus parámetros técnicos y estructurales. Lo anterior permitirá identificar aspectos destacados en el empleo de las distintas configuraciones de antenas y sugerir líneas de investigación futuras que contribuyan con el desarrollo de esta área. Para ello, se realiza una revisión de literatura de artículos de investigación, trabajos presentados en conferencias y simposios, entre otros, que permitan conocer las diferentes propuestas existentes en torno al tema de estudio. Como resultado, se encuentra que existe una gran variedad de configuraciones y técnicas para el diseño de estas antenas, con los cuales se puede modificar el patrón de radiación y mejorar la ganancia. Se concluye entonces, que no existe un patrón definido de construcción para obtener la antena ideal. Sin embargo, se abre una perspectiva a la investigación para establecer y evaluar nuevas estructuras y materiales para la optimización de este tipo de antenas utilizadas en la recolección de energía de RF como otra alternativa para la carga de dispositivos de baja potencia y el desarrollo de la tecnología de internet de las cosas (IoT).

**Palabras clave:** Antenas de microcinta; ancho de banda; recolección de energía RF; arreglos de antenas; sensores de redes inalámbricas

## Analysis of Microstrip Antennas for Wireless Energy Harvesting

**Abstract:** This document reviews microstrip antennas used in wireless energy transfer and collection systems in microwave bands, based on their technical and structural parameters. The foregoing will allow the identification of outstanding aspects in the use of the different antenna configurations and suggest future lines of research that contribute to the development of this area. For this, a literature review of research articles, papers presented at conferences and symposiums, among others, is carried out which allows knowing the different existing proposals around the subject of study. As a result, it is found that there is a great variety of configurations and techniques for the design of these antennas, with which the radiation pattern can be modified, and the gain improved. It is concluded then that there is no defined construction pattern to obtain the ideal antenna. However, a research perspective is opened to establish and evaluate new structures and materials for the optimization of this type of antennas used in the collection of RF energy as another alternative for the charging of low power devices and the development of the internet of things (IoT) technology.

**Keywords:** Microstrip antenna; bandwidth; RF energy harvesting; array antenna; wireless sensors networks

### 1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos electrónicos autoalimentados han llamado la atención en los últimos años. Estos han sido estudiados en una amplia gama de aplicaciones entre los que se incluyen: redes de sensores inalámbricos, edificios inteligentes e Internet de las cosas (IoT) (Brown, 1996; Parthiban, 2020). Incluso, la industria automotriz la usa constantemente en la carga de vehículos eléctricos, también, es utilizada en electrodomésticos (Reyes-Vera et al., 2018) y en el campo biomédico.

La necesidad de implementar dispositivos de recolección de energía es cada vez mayor debido a los problemas que generan la carga, el reemplazo y el mantenimiento en sistemas convencionales que utilizan baterías como fuente de alimentación debido al desperdicio de energía que se genera en el proceso de conversión de carga de teléfonos móviles, tablets y otros componentes de detección y activación. Este problema puede ser resuelto mediante la recolección de energía electromagnética radiada existente en el ambiente (Miranda-Pantoja, 2002). En la Tabla 1, se presenta un resumen de fuentes alternativas de energía que podrían reemplazar las baterías convencionales.

\*vgarcia@americana.edu.co

Recibido: 20/09/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.05

CC 4.0

**Tabla 1.** Resumen de fuentes alternativas de energía para reemplazar baterías

Fuente	Densidad de potencia	Tecnología de cosecha	Ventajas	Desventajas
Solar	Interior: $10 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Exterior: $10 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Fotovoltaica	Alta densidad de potencia	Exposición a la luz (no implantable) costoso
Vibración	Humano: $4 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Industrial: $100 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Piezoeléctrico Electrostático Electromagnético	Implantable Alta eficiencia	Limitación física del material
Térmico	Humano: $4 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Industrial: $1,1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Termoeléctrico Piroeléctrico	Alta densidad de potencia implantable	Exceso de calor
RF	GSM: $0,1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ WI – FI: $1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Antena	Siempre disponible implantable	Baja densidad eficiencia proporcional a la distancia

Fuente: Tran et al. (2017)

La idea de la recolección de energía de RF se dio a conocer a principios de los 90, pero el concepto de convertir la energía de microondas en energía eléctrica fue iniciado por Nicola Tesla en 1901 (Brown, 1996). Debido a que la energía de RF junto a otras fuentes de energía alternativa depende del entorno, hacen que esta tecnología sea efectiva en aplicaciones críticas como monitoreo ambiental, atención médica, y defensa (Reyes-Vera et al., 2018).

Las antenas son elementos de vital importancia en los sistemas inalámbricos ya que determinan el rendimiento de dicho sistema. Existen varios tipos de antenas y su uso depende del rango de frecuencia de operación, tamaños, patrón de radiación, adaptabilidad a la aplicación, entre otros requerimientos (Choukiker et al., 2014; Miranda Pantoja, 2002). Para este caso, en el diseño de las antenas se emplean estructuras como antenas de microcinta o tipo parche, las cuales consisten en una tira metálica muy delgada colocada sobre un plano de tierra con un material dieléctrico en el medio. Estas antenas poseen un alto grado de adaptabilidad para operar en el rango de frecuencia de microondas (Mathur & Gupta, 2015).

Al utilizar estas técnicas de microcinta se obtienen antenas más compactas, de bajo costo, alto rendimiento y de fácil instalación, además por medio de fotograbado son integradas sin dificultad a placas de circuitos impresos (Printed Circuit Board, PCB) (García-Domínguez, 2010). Sin embargo, al construir antenas de microcinta pueden surgir algunos inconvenientes debido al comportamiento de sus componentes y al rango de frecuencia deseado. Dichos componentes deben modelarse como elementos distribuidos, no concentrados, debido a que su tamaño es proporcional a la longitud de onda de operación. También pueden presentarse fenómenos físicos como la resonancia y efectos de acoplamiento entre

componentes que pueden perjudicar el objetivo del diseño (Islam et al., 2017).

Para solucionar este tipo de problemas se utilizan técnicas computacionales con el fin de resolver las ecuaciones de Maxwell (Balanis, 1992), que explican los fenómenos de la propagación en las antenas.

Entre los métodos computacionales usados para resolver estos sistemas se encuentran: el Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM) (Zeng & Liu, 2018), el Método de Momentos (Method of Moments, MoM) (Chen & Ney, 2007; Weigand et al., 2003), el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (Finite-Difference Time Domain method, FDTD) (Navarro et al., 2003) y optimización por enjambre de partículas Particle Swarm Optimization (PSO) (Demircioglu et al., 2015), esta última permite mejorar el rendimiento del sistema. Debido a las respuestas obtenidas con los métodos computacionales se obtienen respuestas que permiten la optimización de las antenas y así mejorar y ajustar los parámetros del sistema deseado.

Por lo anterior, en este documento se realiza una revisión de las antenas de microcinta para sistemas de captación de energía RF, en función de sus parámetros estructurales, para identificar aspectos que generan las configuraciones realizadas en determinados diseños y así contribuir a investigaciones que desarrollan sistemas de recolección de energía electromagnética radiada por medio de antenas.

## 2. ANTENAS RECOLECTORAS DE ENERGÍA RF

Las antenas son diseñadas para resonar a determinadas frecuencias de operación, su clasificación es basada en las características y aplicaciones del diseño. Las antenas de recolección de energía están en etapa de desarrollo y con el crecimiento de la tecnología hay una gran variedad de métodos

de diseño y fabricación de antenas, para que sean compactas y eficientes. De acuerdo con lo señalado, son ideales para los teléfonos móviles, dispositivos portátiles e implantables, entre otros. Algunos de los métodos más comunes para la miniaturización de antenas de microcinta son:

- Ranuras en el parche radiante (Awais et al., 2018).
- Uso de metamateriales (Benayad & Tellache, 2020).
- Uso de sustratos de alta permitividad (Hidayah et al., 2019).
- Uso de estructuras de tierra defectuosa (DGS) (Pandhare et al., 2016).
- Modificar la longitud de onda de la antena mediante la optimización de la geometría (Rezaghali & Mohajeri, 2016).

Se ha demostrado que las antenas de banda estrecha (Choukiker et al., 2014), ofrecen alta eficiencia de conversión de energía, pero solo pueden recuperar una cantidad limitada de esta debido al estrecho ancho de banda que poseen. Por otro lado, las antenas multibanda son muy útiles debido a que son resonantes en varias frecuencias (García-Domínguez, 2010; Mathur & Gupta, 2014; Reyes-Vera et al., 2018), así como las antenas de banda ancha (Balanis, 1992; Islam et al., 2016; Zeng & Liu, 2018) y de ultra-banda ancha (UWB) (Chen & Ney, 2007; Weigand et al., 2003) que pueden recuperar más energía de las ondas de radio que hay en el espacio, aunque, estas antenas son utilizadas en sistemas de imágenes, sistemas de comunicaciones y de radar. En la Tabla 2, se realiza una comparación de varios diseños de antenas de microcinta según su tamaño.

**Tabla 2.** Comparación de diseños de antenas microcinta según el tamaño

Tipo de Antena	Técnica de reducción	Frecuencia (GHz)	BW (MHz %)	Ganancia (dBi)	Reducción de tamaño (%)
Antena invertida en F (Lin, et al., 2005)	Constante Dieléctrica alta	1,8	5,7	7	75
Antena de banda Dual fractal (Shrestha et al., 2014a)	Alfombra de Sierpinski	2,45 – 5,8	1	2,7	25,98
Antena de parche compacto (Sim et al., 2010a)	Incrustación de 4 ranuras	0,87	1,87	3,8	29
Antena de anillo dividido (Benayad & Tellache, 2020a)	Metamaterial	1,8 – 2,1, 2,45	96,3	32,4 – 3,01	63,75
Miniaturización antena parche (Lamsalli, et al., 2016)	Algoritmo genético	2,16 – 3,5	-	5,82	82

Fuente: elaboración propia

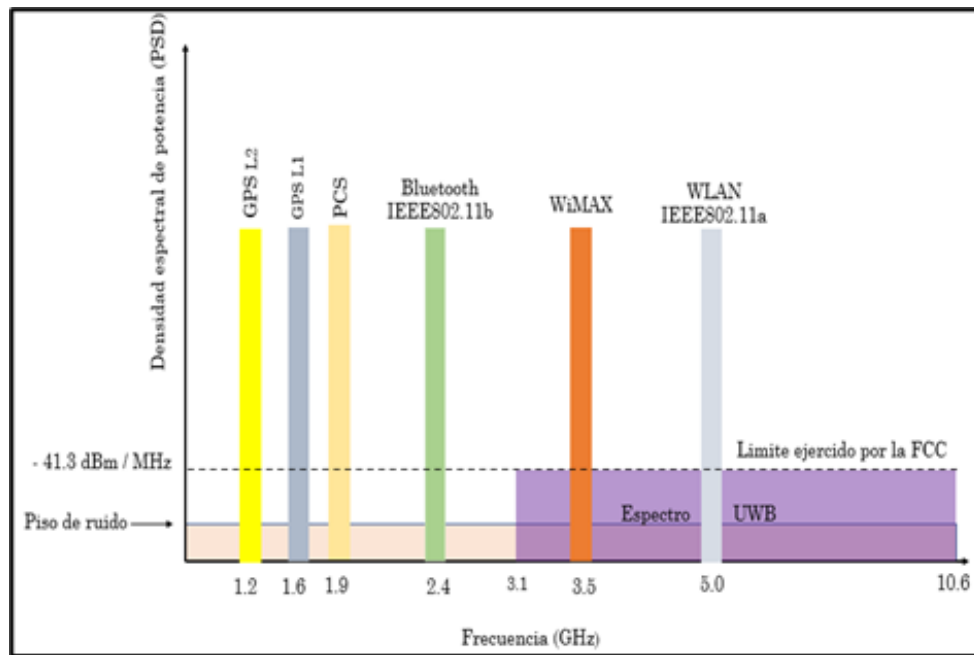
Las antenas UWB poseen cualidades especiales para sistemas de captación de energía electromagnética radiada, puesto que tienen rangos de frecuencias de operación que van desde los 3.1 a 10.6 GHz con un ancho de banda mayor o igual a 500 MHz independiente de su frecuencia central (Ren et al., 2014; Mohamed et al., 2019). UWB es una banda de frecuencia sin licencia, según la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) (Aiello & Rogerson, 2003), proporciona altas velocidades de datos y baja densidad espectral de potencia, la restricción de baja potencia de -44,3 dBm atrae una amplia gama de aplicaciones en comunicaciones de corto alcance (Doddipalli & Kothari, 2019).

Este tipo de antenas opera en las bandas de Microondas desde la banda L hasta la banda K, abarcando servicios de comunicaciones como: CDMA, UMTS, PCS, GSM y LTE; redes inalámbricas como: WPAN, WBAN, WLAN y WIMAX, también en sistemas satelitales y aplicaciones militares. En la Figura 1, se presenta el comportamiento de UWB frente a otras tecnologías de banda estrecha convencionales como: GPS L1 y L2 para sistemas de navegación satelital. L1 funciona entre 1575 MHz con un ancho de banda de 18,03 MHz y L2 en 1227 MHz con un

ancho de banda de 17,66 MHz. PCS (Servicio de Comunicación Personal), que son servicios de telefonía móvil que operan en las bandas de radio entre 1800 o 1900 MHz, con anchos de banda entre 10 y 20 MHz dependiendo del país. El sistema IEEE802.11b opera en la banda de 2,45 GHz con un ancho de banda de 25 MHz, seguido de WiMAX que trabaja en 3.1 GHz hasta 3,5 GHz con anchos de banda entre 1,25 MHz hasta 20 MHz, finalmente IEEE802.11a/g que opera en la banda ISM de 2,45 GHz a 5 GHz con un ancho de banda de 20 MHz.

### 3. METODOLOGÍA

Con el propósito de establecer un punto de referencia para la investigación sobre análisis de las antenas microcinta para cosecha de energía electromagnética radiada, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura académica (Beltrán, 2019). Esta revisión tiene como objetivo principal examinar las perspectivas de varios autores que han abordado este tema, así como los métodos, herramientas y contextos empleados hasta ahora. Además, se busca identificar las variables asociadas al diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía.



**Figura 1.** Espectros de banda estrecha vs UWB Fuente: Doddipalli & Kothari (2019)

Para lograr esto, se lleva a cabo una revisión detallada que permita una comprensión clara de los conceptos, el estado actual de las investigaciones relacionadas y las contribuciones al conocimiento en este campo (Manterola et al., 2013). Diversas bases de datos bibliográficas se utilizan para recopilar información, y el software Excel se emplea para organizar y analizar los artículos encontrados.

Las revisiones sistemáticas representan una forma de investigación observacional y retrospectiva que sintetiza los resultados de múltiples estudios primarios. Su objetivo principal es resumir la información existente sobre un tema específico y determinar las variables clave y causales que influyen en la investigación (Cañas et al., 2023). Para llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura, se proponen los siguientes cinco pasos:

1. Definir una pregunta de investigación clara que esté alineada con los objetivos e hipótesis de la investigación. En este caso, la pregunta sería: "¿Cuáles son los parámetros relacionados al diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía?".
2. Establecer criterios de inclusión y exclusión para los estudios. Se considerarán únicamente los artículos que se centren específicamente en el diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía.
3. Definir la estrategia de búsqueda. Se seleccionarán bases de datos que incluyan revistas de alto impacto a nivel internacional, que cubran todas las áreas del conocimiento.
4. Registrar los datos y evaluar los documentos seleccionados. Los artículos se seleccionarán de

acuerdo con criterios como la calidad de la revista en la que se publicaron, su relación con la ingeniería de electrónica y telecomunicaciones, y la relevancia del contenido en relación con el almacenamiento de energía

5. Interpretar y presentar los resultados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Configuración de antenas microcinta

En esta sección, se realiza la caracterización de antenas utilizadas en sistemas de transferencia y recolección de energía electromagnética radiada teniendo en cuenta su configuración básica como se muestra en la Figura 2. Estas antenas son construidas con la técnica de circuitos impresos debido a las ventajas ofrecidas como: bajo costo, alto rendimiento y miniaturización del diseño (Nawaz et al., 2013).

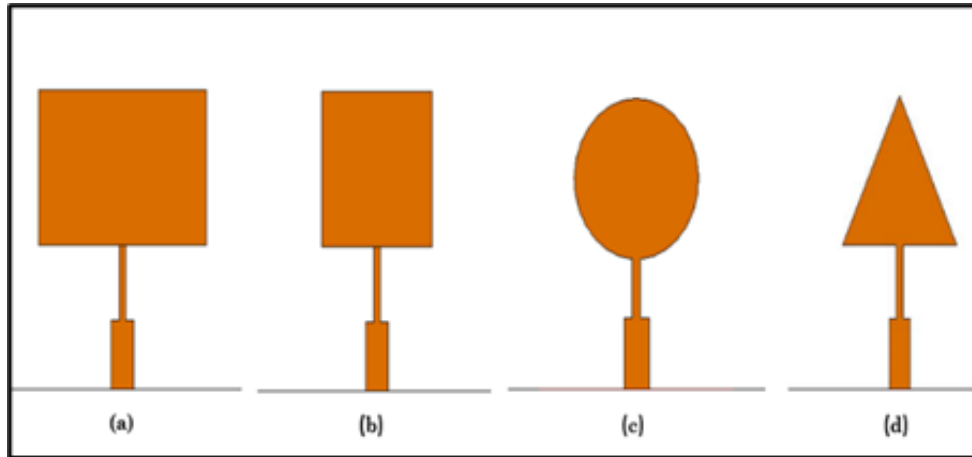
En la Figura 3, se presenta un diagrama de barras de acuerdo con la tendencia estimada sobre los diseños de antenas que son más utilizadas. Esta revisión se realiza en 40 artículos.

Según lo expuesto previamente, la configuración que es más utilizada en el diseño de antenas de microcinta es la PRMA (antena impresa rectangular monopolo), esto debido a que es fácil de diseñar y construir. El segundo caso más usado es la configuración de OTROS, donde se encuentran geometrías fractales y geometrías con muescas (huecos alargados), las cuales se realizan en el parche radiante y cumplen la función de filtros dependiendo del número de muescas realizadas en el parche radiante (Li et al., 2022). Es evidente que, existe un gran número de antenas utilizadas en la recolección de energía electromagnética radiada, lo que indica que hay un campo abierto para establecer criterios de selección. En este sentido, se debe evaluar aspectos como: la ganancia, la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, ya que son parámetros que

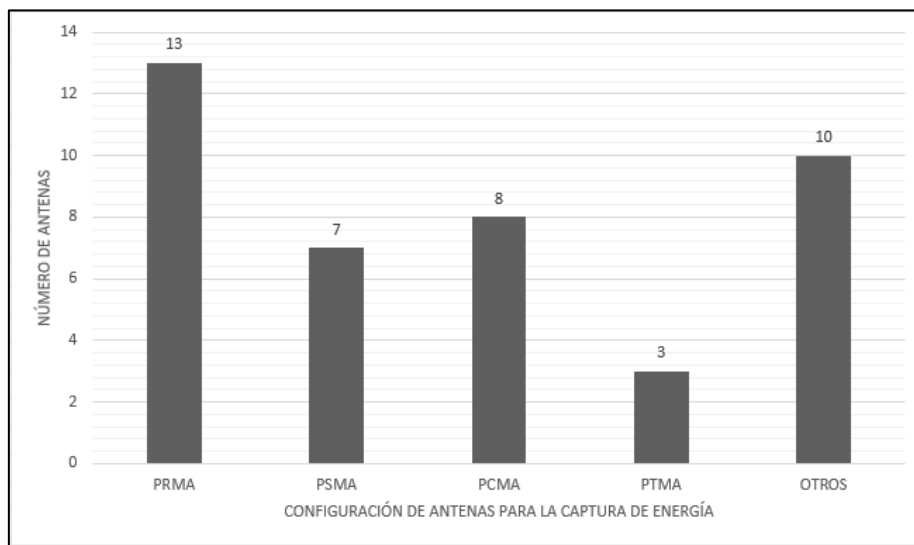
caracterizan el rendimiento de una antena como recolectora de energía (Miranda-Pantoja, 2002).

Por otra parte, también se utilizan combinaciones o arreglos de antenas conocidas como arreglo convencional de antenas de microcinta (CMAA), que constan de dos, cuatro o más parches de radiación idénticos, los cuales son agrupados y regularmente tienen forma rectangular (Awais et al., 2018; Demircioglu et al., 2015). Estos arreglos son utilizados para modificar el patrón de radiación y aumentar la ganancia, como

en Demircioglu et al., (2015), que se realizó una red de antenas microcinta convencional resonando a 5,53 GHz y produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 2,35 % y -17,83 dB. El primer conjunto de antenas propuesto produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 66,60 % y -35,66 dB, mientras que el segundo conjunto de antenas propuesto produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 63,27 % y -32,81 dB respectivamente. En la Tabla 3, se presenta el rango de frecuencias y aplicaciones de las antenas microcinta.



**Figura 2.** Configuración de antenas microcinta. (a) Printed Rectangular Monopole Antenna (PRMA), (Zhang et al., 2010a), (b) Printed Square Monopole Antenna (PSMA) (Ojaroudi et al., 2009a), (c) Printed Circular Monopole Antenna (PCMA), (Mondal & Sarkar, 2012), (d) Printed Triangle Monopole Antenna (PTMA), (Lin et al., 2005). Fuente: elaboración propia



**Figura 3.** Tendencia de antenas diseñadas en función de su configuración. Fuente: elaboración propia

**Tabla 3.** Rango de Frecuencias y aplicaciones de las Antenas microcinta

Configuración	Rango (GHz)	Aplicaciones
PRMA	0,84-18,0	2,45/5 GHz, WIMAX, Satélites
PSMA	2,26-22,5	2,45 GHz, WLAN, WPAN, GPS
PCMA	1,50-20,0	2,45 GHz, WLAN, WPAM, WBAN
PTMA	1,40-11,6	2,45 GHz, UMTS, PCS

Fuente: elaboración propia

#### 4.2. Modificaciones en la estructura de las Antenas microcinta

Generalmente para la construcción de antenas tipo parche, se usa un material conductor como el cobre acompañado de un dieléctrico, donde puede variar la permitividad eléctrica dependiendo del material utilizado y esto permite una reducción en las dimensiones de los diseños y disminuye las pérdidas en el dieléctrico (Benayad & Tellache, 2020b; Mohd Yunus et al., 2019; Pandhare et al., 2016).

La estructura de las antenas se puede modificar desde el parche radiante hasta el plano de referencia, dependiendo de la aplicación, para esto existen técnicas como: las estructuras fractales que son compactas, multibanda o de banda ancha, que tienen aplicaciones útiles en comunicaciones para telefonía celular y microondas (Shrestha et al., 2014b; Sim et al., 2010b; Rezagholi & Mohajeri, 2016) y elementos parásitos utilizados para modificar el patrón de radiación de una antena (Lamsalli, et al., 2016).

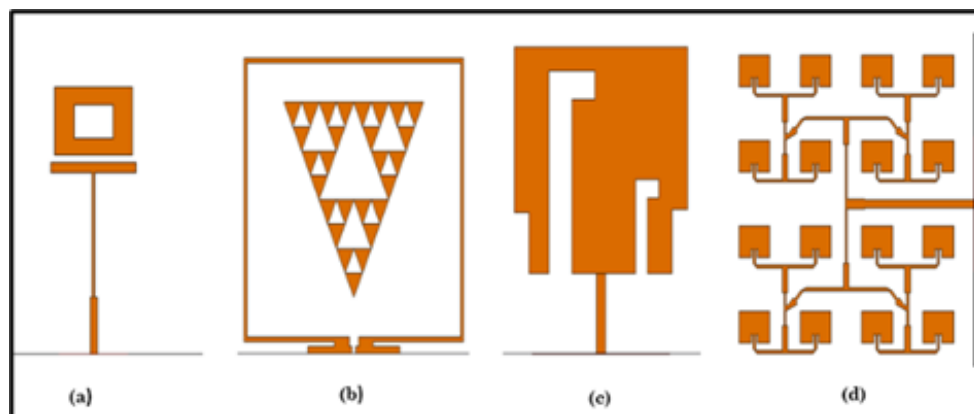
También, se utilizan técnicas de ranura para disminuir la pérdida de potencia debido a la reducción del acoplamiento entre las antenas radiantes (Mohd Yunus et al., 2019), luego, están las combinaciones de antenas de ranura y resonadores que ofrecen un ancho de banda amplio además de otras ventajas como: alta ganancia, alta eficiencia de radiación, baja pérdidas en los conductores y compatibilidad con diferentes mecanismos de alimentación (Aiello & Rogerson, 2003; Ren et al., 2014; Mohamed et al., 2019). Los arreglos de antenas están conformados por un conjunto de antenas iguales, que están alineadas de forma que se suman sus diagramas de radiación (Doddipalli & Kothari, 2019).

Las técnicas de modificación y adición de elementos parásitos de diferentes geometrías en los parches sirven para mejorar el acoplamiento de impedancia. También, eliminando material del parche radiante o del plano de referencia con formas de ranuras, y al aplicar estructuras fractales en el parche resonante se pueden mejorar los parámetros de la antena para conseguir una máxima transferencia de potencia y disminuir las pérdidas de retorno en la frecuencia de operación. En la Tabla 4, se resumen brevemente algunas técnicas y geometrías más utilizadas para modificar antenas de microcinta. En la Figura 4, se observan diferentes geometrías y arreglos de antenas microcinta.

**Tabla 4.** Técnicas y geometrías más utilizadas para modificar Antenas microcinta

Técnica	Objetivo	Referencias
Estructuras Fractales	Reducir dimensiones de la antena Aumentar el ancho de banda	(Nawaz et al., 2013; Ojaroudi et al., 2009b; Zhang et al., 2010b)
Ranuras, elementos parásitos	Mejorar la ganancia, el acople De impedancia, reducen Las dimensiones de la antena	(Aiello & Rogerson, 2003; Ren et al., 2014)
Arreglo de antenas	Mejoran la ganancia, cambian el Patrón de radiación	(Bansal, 1983; Kim & Nam, 2017; C.-C. Lin et al., 2005)

Fuente: elaboración propia



**Figura 4.** (a) Antena con anillo Resonador, (b) Antena Fractal Triángulo de Sierpinski con anillo resonador, (c) Antena Ranurada, (d) Array de Antenas.

Fuente: elaboración propia

#### 4.3. Parámetros técnicos

Entre los parámetros técnicos de las antenas de microcinta, para que el parche radie, se debe excitar mediante dispositivos de alimentación como son: por la línea de transmisión, por proximidad, por ranura radiante y por cable coaxial (Weigand et al., 2003). Además de otros parámetros como:

##### 4.3.1. Factor ( $Q$ ) factor de calidad

En los circuitos eléctricos, el factor  $Q$  de un circuito sintonizado (incluyendo antenas) describe cuantas veces pasa la corriente a través del circuito, es decir cuánto aumenta el



voltaje pico cuando el sistema resuena a una frecuencia resonante (Liu et al., 2020; Lopes et al., 2018). El factor Q es una medida de la eficiencia de radiación de la antena.

La ecuación del factor Q se puede expresar como:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energía almacenada}}{\text{energía disipada por ciclo}} \text{ o } Q = \frac{f_c}{\Delta f} \quad (1)$$

Dónde  $f_c$  = frecuencia central y  $\Delta f = f_2 - f_1$  de la ecuación anterior se deduce que un factor Q alto viene con un ancho de banda resonante estrecho, pero se obtiene una ganancia de voltaje alta en la resonancia. Igualmente, también señala que el factor Q es inversamente proporcional a la energía disipada por ciclo.

#### 4.3.2. Eficiencia de conversión

La eficiencia es la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma (Balanis, 2013). La eficiencia de conversión de potencia es la relación entre la cantidad de energía aplicada y la carga recuperada por la antena. Sin considerar las pérdidas en el espacio libre, esta se calcula así:

$$\eta_{PCE} = \frac{P_{load}}{P_{retrived}} \quad (2)$$

Dónde  $P_{load}$  = energía entregada a la carga,  $P_{retrived}$  = energía recuperada en la antena.

#### 4.3.4. Sensibilidad

La sensibilidad es definida como la potencia mínima que se requiere para activar el funcionamiento del sistema (antena) (Miranda-Pantoja, 2002):

$$\text{Sensibilidad (dBm)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3)$$

Dónde  $P$  = potencia mínima para activar un sistema.

Los anteriores parámetros son utilizados para realizar comparaciones. Aun así, existen compensaciones entre estos valores, algunos como la distancia de operación y la eficiencia general. Otro factor es el bajo costo en la fabricación de las antenas. De manera similar, la ganancia de una antena (en una dirección dada) es considerada como la relación entre el valor de la intensidad de la señal transmitida en la dirección más eficiente. Si se utiliza como referencia una antena isotrópica, este parámetro será medido en dBi, entonces la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradia isotrópicamente, la intensidad de radiación correspondiente es igual a la potencia aceptada (entrada) por la antena (Balanis, 2013).

Se debe tener en cuenta que las antenas no siempre transmiten energía de forma esférica (antena isotrópica), el radiador ideal no existe en la práctica, pero el concepto es de gran utilidad para analizar el comportamiento en antenas reales (Valenzuela Medina, 2005). Ya que, estas transmiten energía en algunas direcciones específicas de acuerdo con su diseño.

Así que, dependiendo de las aplicaciones se podría optar por usar antenas de alta ganancia para la transmisión de radiofrecuencias si se conociera la posición de la fuente emisora para ubicar las antenas receptoras. Sin embargo, si la posición de la fuente y la antena receptora son relativamente desconocidas, es preferible usar una antena de baja ganancia para recolectar señales simultáneamente desde varias direcciones.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Puesto que, las antenas son diseñadas para resonar a determinadas frecuencias de operación, su clasificación se basa en las características y aplicaciones del diseño. Las antenas de recolección de energía están en etapa de desarrollo, con el crecimiento de la tecnología hay una gran variedad de métodos de diseño y fabricación de antenas, para que sean compactas y eficientes. En cuanto al comportamiento de las ondas electromagnéticas y la relación que depende de la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora, existen características que se clasifican en dos segmentos: campo lejano y campo cercano (Yaghjian, 1986).

El patrón de onda electromagnética en el campo lejano es relativamente uniforme, mientras que, en el campo cercano, es muy fuerte e independiente de los componentes eléctricos y magnéticos, de modo que un componente puede dominar al otro. En consecuencia, la región de campo cercano se considera como el espacio que se encuentra dentro de la distancia del Fraunhofer o como el comportamiento de propagación de las señales de Radio frecuencia, debido a que existe directa dependencia con las características del gradiente de la atmósfera del lugar donde se diseña un radio enlace de microondas, la región del campo lejano se encuentra fuera de la distancia del Fraunhofer (Selvan & Janaswamy, 2017; Parrent et al., 1964).

### 5.1 Comparación de resultados de diferentes diseños de antenas para captación de energía RF

La Tabla 5 muestra la comparación de resultados de varios diseños de antenas microcinta basados en potencia de entrada, potencia de salida, ganancia de antena y eficiencia de conversión total alcanzada en diferentes frecuencias de resonancia. También es importante conocer la energía que consumen algunos dispositivos o sensores de baja potencia como se indica en la Tabla 6.

## 6. CONCLUSIONES

Como las radiaciones de RF ambientales son débiles y abarcan un amplio espectro de frecuencias, las antenas con ancho de banda de gran impedancia, alta ganancia y eficiencia de radiación son las que predominan en la elección de los investigadores. Las características antes mencionadas se pueden lograr y mejorar aplicando técnicas de modificación, el uso de ranuras es una de las técnicas más relevante, ya que son utilizadas de alguna forma en los demás diseños.

En este documento, los autores no optaron por seleccionar ninguna de las opciones de diseño y técnicas ya que no se

evaluaron los materiales utilizados en el diseño de antenas tipo parche, estos son fundamentales para evaluar el rendimiento de una antena recolectora de energía ya que sus propiedades

físicas y químicas intervienen de forma directa en el comportamiento de la antena.

**Tabla 5.** Comparación de resultados de diferentes Diseños de Antenas captadoras de energía RF

Frecuencia	Tipo de antena	Potencia de entrada	Potencia de salida	Eficiencia	Cita
2,45 GHz	Bow tie-shaped	-30 a -5 dBm	-	67 a -5 dBm	(Song et al., 2016)
900 MHz	Square- Dipolo	0-9 dBm	-	60 a 7 dBm	(Ladan et al., 2013)
5,8 GHz	Dipolo	100-20 dBm	-	76 a 20 dBm	(Tu et al., 2007)
2,45 GHz	Parche rectangular	-30 a 15 dBm	-	83 a 0 dBm	(Hucheng Sun et al., 2012)
2,1-2,45 GHz	Anillo resonador	0-20 dBm	-	84 a -15 dBm	(Takhedmit et al., 2012)
850 MHz-1.94 GHz	Monopolo Triangular	0-10 dBm	-	60 a 980 dBm	(Arrawatia et al., 2015)
900 MHz	Antena diferencial	-10 a 15 dBm	-	65.3 a 3 dBm	(Kumar & Chaudhary, 2018)
2,45 GHz	Parche rectangular	13 dBm	4.2 V	14 dBm	(Nie et al., 2015)

Fuente: elaboración propia

**Tabla 6.** Cantidad de potencia utilizada por algunos dispositivos y sensores

Dispositivo	Potencia utilizada
Wi-Fi	210 $\mu$ W
Detector de humo	55 $\mu$ W
Smartwatch	31 mW
Led	60 mW
Smartphone	0,5 W
Mouse	20 mW
Detector de CO	1,5 mW
Medidor de Gas	5,12 mW
Bombilla	1 W
Calculadora pequeña	2 $\mu$ W
Audifono	1,5 mW
Termómetro digital	20 $\mu$ W

Fuente: Tu et al. (2007)

Finalmente, dependiendo del material utilizado y las variables previamente mencionadas, se pueden lograr diseños más compactos a frecuencias de resonancia más altas. Al realizar combinaciones de diferentes configuraciones las antenas pueden ser optimizadas para la recolección de energía electromagnética radiada. También, se puede afirmar que las

antenas UWB pueden aplicarse para la recolección de energía RF, ya que poseen un amplio ancho de banda y representan buenas características de ajuste de impedancia.

## 7. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se recomienda un análisis más profundo de las diferentes técnicas y diseños de antenas tipo parche, sin discriminar en aplicaciones para la recolección de energía. Adicionalmente, se podría realizar la simulación de la combinación de los diferentes tipos de diseños para diversas aplicaciones incluyendo la recolección de energía de tal manera que se tenga un horizonte más cercano de los resultados y así posterior aplicación en el ámbito de un laboratorio.

Se recomienda también, la revisión del problema de investigación utilizando la metodología de análisis bibliométrico, con el fin de determinar diferentes variables que señalen de forma más clara la tendencia de investigación en el tema estudiado. Se recomienda a los lectores para continuar fortaleciendo el conocimiento sobre diseño de antenas microcinta consultar los libros de DAVID M. POZAR.

## REFERENCIAS

- Aiello, G. R., & Rogerson, G. D. (2003). Ultra-Wideband Wireless Systems. *IEEE Microwave Magazine*, 4(2), 36–47. <https://doi.org/10.1109/MMW.2003.1201597>
- Arrawatia, M., Baghini, M., & Kumar, G. (2015). Broadband Bent Triangular Omnidirectional Antenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2427232>
- Awais, Q., Jin, Y., Chattha, H. T., Jamil, M., Qiang, H., & Khawaja, B. A. (2018). A Compact Rectenna System With High Conversion Efficiency for Wireless Energy Harvesting. *IEEE Access*, 6, 35857–35866. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2848907>
- Balanis, C. A. (1992). Antenna theory: a review. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 7–23. <https://doi.org/10.1109/5.119564>
- Balanis, C. A. (2013). Antenna theory. In *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter* (Vol. 25, Issue 2). <https://doi.org/10.1109/map.1983.27674>
- Bansal, R. (1983). Antenna theory. *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, 25(2), 21–22. <https://doi.org/10.1109/MAP.1983.27674>
- Beltrán, O. A. (2005). Revisión sistemática de la literatura. *Rev Colomb Gastroenterol*, 20, 60–69. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcg/v20n1/v20n1a09.pdf>
- Benayad, A., & Tellache, M. (2020a). A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2), 1–11. <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>
- Benayad, A., & Tellache, M. (2020b). A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>
- Brown, W. C. (1996). The history of wireless power transmission. *Solar Energy*, 56(1), 3–21. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00080-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00080-B)
- Chen, Z., & Ney, M. M. (2007). Method of Moments: A General Framework for Frequency- and Time-domain Numerical Methods. *2007 Workshop on Computational Electromagnetics in Time-Domain*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CEMTD.2007.4373527>
- Choukiker, Y. K., Sharma, S. K., & Behera, S. K. (2014). Hybrid Fractal Shape Planar Monopole Antenna Covering Multiband Wireless Communications With MIMO Implementation for Handheld Mobile Devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(3), 1483–1488. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2295213>
- Demircioglu, E., Yagli, A. F., Gulgonul, S., Ankishan, H., Tartan, E. O., Sazli, M. H., & Imeci, T. (2015). Slot Parameter Optimization for Multiband Antenna Performance Improvement Using Intelligent Systems. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/165717>
- Doddipalli, S., & Kothari, A. (2019). Compact UWB Antenna With Integrated Triple Notch Bands for WBAN Applications. *IEEE Access*, 7, 183–190. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885248>
- García-Domínguez, A. (2010). *Cálculo de antenas: antenas de última generación para tecnología digital y métodos de medición*. Marcombo.
- Hucheng Sun, Yong-xin Guo, Miao He, & Zheng Zhong. (2012). Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 929–932. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2212232>
- Islam, M. T., Samsuzzaman, M., Islam, M. M., Mahmud, M. Z., & Islam, M. T. (2016). A compact patch antenna for ultrawideband application. *2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICISSET.2016.7856512>
- Ren, J., Hu W., Yin, Y. & Fan, R. (2014). Compact Printed MIMO Antenna for UWB Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1517–1520. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2343454>
- Kim, J.-H., & Nam, S. (2017). A Compact Quasi-Isotropic Antenna Based on Folded Split-Ring Resonators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 294–297. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2573849>
- Kumar, D., & Chaudhary, K. (2018). DESIGN OF DIFFERENTIAL SOURCE FED CIRCULARLY POLARIZED RECTENNA WITH EMBEDDED SLOTS FOR HARMONICS SUPPRESSION. *Progress In Electromagnetics Research C*, 84, 175–187. <https://doi.org/10.2528/PIERC18021401>
- Ladan, S., Ghassemi, N., Ghiotto, A., & Wu, K. (2013). Highly Efficient Compact Rectenna for Wireless Energy Harvesting Application. *IEEE Microwave Magazine*, 14(1), 117–122. <https://doi.org/10.1109/MMM.2012.2226629>
- Lamsalli, M., El Hamichi, A., Boussouis, M., Touhami, N. A., & Elhamadi, T. E. (2016). Genetic algorithm optimization for microstrip patch antenna

- miniaturization. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 60(May), 113–120. <https://doi.org/10.2528/PIERL16041907>
- Li, Y., Meyer, J., Lokki, T., Cuenca, J., Atak, O., & Desmet, W. (2022). Benchmarking of finite-difference time-domain method and fast multipole boundary element method for room acoustics. *Applied Acoustics*, 191, 108662. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108662>
- Lin, C. C., Kan, Y. C., Kuo, L. C., & Chuang, H. R. (2005). A planar triangular monopole antenna for UWB communication. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15(10), 624–626. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.856694>
- Liu, Y., Cai, Y., Zhang, Y., Tovstopyat, A., Liu, S., & Sun, C. (2020). Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review. *Micromachines*, 11(7), 630. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/mi11070630>
- Lopes A.C., Sagasti A., Lasheras A., Muto V., Gutiérrez J., Kouzoudis D., Barandiarán J.M. (2018). Accurate Determination of the Q Quality Factor in Magnetoelastic Resonant Platforms for Advanced Biological Detection. *Sensors (Basel)*, 18(3). <http://10.3390/s18030887>
- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E. y Claros, N. (2013). Revisión sistemática de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cir Esp*, 91(3), 149–155. <http://10.1016/j.ciresp.2011.07.009>
- Mathur, V., & Gupta, M. (2014). Comparison of performance characteristics of rectangular, square and hexagonal microstrip patch antennas. *Proceedings of 3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRITO.2014.7014684>
- Miranda-Pantoja, J. M. (2002). *Ingeniería de microondas: técnicas experimentales*. Prentice Hall.
- Mohamed, I., Abdalla, M., & Mitkees, A. E.-A. (2019). Perfect isolation performance among two-element MIMO antennas. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 107, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.014>
- Mohd Yunus, N., Yunas, J., Pawi, A., Rhazali, Z., & Sampe, J. (2019). Investigation of Micromachined Antenna Substrates Operating at 5 GHz for RF Energy Harvesting Applications. *Micromachines*, 10(2), 146. <https://doi.org/10.3390/mi10020146>
- Mondal, S., & Sarkar, P. P. (2012). Wideband Bidirectional Planar Shorted Circular Monopole Antenna. *Procedia Technology*, 4, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.066>
- Navarro, E. A., Segura, J., & Sanchis Francés, R. (2003). Aplicación del método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) al estudio de problemas acústicos bidimensionales. *Revista de Acústica*, 34(3–4), 19–28.
- Nawaz, M. I., Huiling, Z., Sultan Nawaz, M. S., Zakim, K., Zamin, S., & Khan, A. (2013). A review on wideband microstrip patch antenna design techniques. *2013 International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICASE.2013.6785554>
- Nie, M.-J., Yang, X.-X., Tan, G.-N., & Han, B. (2015). A Compact 2.45-GHz Broadband Rectenna Using Grounded Coplanar Waveguide. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 986–989. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2388789>
- Ojaroudi, M., Ghanbari, G., Ojaroudi, N., & Ghobadi, C. (2009a). Small square monopole antenna for UWB applications with variable frequency band-notch function. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1061–1064. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2030697>
- Ojaroudi, M., Ghanbari, G., Ojaroudi, N., & Ghobadi, C. (2009b). Small Square Monopole Antenna for UWB Applications With Variable Frequency Band-Notch Function. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1061–1064. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2030697>
- Pandhare, R. A., Zade, P. L., & Abegaonkar, M. P. (2016). Miniaturized microstrip antenna array using defected ground structure with enhanced performance. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1360–1367. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.03.007>
- Parent, G. B., Thompson Jr, B. J., George Parent, by B., & Thompson, B. J. (1964). On the Fraunhofer (Far Field) Diffraction Patterns of Opaque and Transparent Objects with Coherent Background. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 11(3), 183–193. <https://doi.org/10.1080/713817880>
- Parthiban, P. (2020). IoT Antennas for Industry 4.0 – Design and Manufacturing with an Example. *2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216349>
- Reyes-Vera, E., Senior, D. E., Luna-Rivera, J. M., & López-Giraldo, F. E. (2018). Advances in electromagnetic applications and communications. *TecnoLógicas*, 21(43), 9–13. <https://doi.org/10.22430/22565337.1052>
- Rezaghali, A., & Mohajeri, F. (2016). Directivity optimization of fractal antenna arrays using PSO algorithm. *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1224–1228. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585708>
- Selvan, K. T., & Janaswamy, R. (2017). Fraunhofer and Fresnel Distances: Unified derivation for aperture antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(4), 12–15. <https://doi.org/10.1109/MAP.2017.2706648>
- Shrestha, S., Lee, S. R., & Choi, D. Y. (2014a). A new fractal-based miniaturized dual band patch antenna for RF energy harvesting. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/805052>
- Shrestha, S., Lee, S. R., & Choi, D.-Y. (2014b). A New Fractal-Based Miniaturized Dual Band Patch Antenna for RF Energy Harvesting. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/805052>
- Sim, Z. W., Shuttleworth, R., Alexander, M. J., & Grieve, B. D. (2010a). Compact patch antenna design for outdoor

## BIOGRAFÍAS

- rf energy harvesting in wireless sensor networks. *Progress in Electromagnetics Research*, 105(January 2015), 273–294. <https://doi.org/10.2528/PIER10052509>
- Sim, Z. W., Shuttleworth, R., Alexander, M. J., & Grieve, B. D. (2010b). COMPACT PATCH ANTENNA DESIGN FOR OUTDOOR RF ENERGY HARVESTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. *Progress In Electromagnetics Research*, 105, 273–294. <https://doi.org/10.2528/PIER10052509>
- Song, C., Huang, Y., Carter, P., Zhou, J., Yuan, S., Xu, Q., & Kod, M. (2016). A Novel Six-Band Dual CP Rectenna Using Improved Impedance Matching Technique for Ambient RF Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 3160–3171. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2565697>
- Takhedmit, H., Cirio, L., Bellal, S., Delcroix, D., & Picon, O. (2012). Compact and efficient 2.45 GHz circularly polarised shorted ring-slot rectenna. *Electronics Letters*, 48(5), 253. <https://doi.org/10.1049/el.2011.3890>
- Tran, LG., Cha, HK. & Park, WT. (2017). RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications. *Micro and Nano Syst Lett* 5, 14. <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0051-0>
- Tu, W.-H., Hsu, S.-H., & Chang, K. (2007). Compact 5.8-GHz Rectenna Using Stepped-Impedance Dipole Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 6, 282–284. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.898555>
- Valenzuela Medina, J. E. (2005). *Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo a la simulación del Campo Electromagnético*. 52(1), 58–64.
- Weigand, S., Huff, G. H., Pan, K. H., & Bernhard, J. T. (2003). Analysis and design of broad-band single-layer rectangular u-slot microstrip patch antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(3), 457–468. <https://doi.org/10.1109/TAP.2003.809836>
- Yaghjian, A. (1986). An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(1), 30–45. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727>
- Zeng, W., & Liu, G. R. (2018). Smoothed Finite Element Methods (S-FEM): An Overview and Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(2), 397–435. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9202-3>
- Zhang, Z., Fu, G., & Zuo, S. (2010a). A compact printed monopole antenna for wlan and wimax applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(4), 857–861. <https://doi.org/10.1002/mop.25060>
- Zhang, Z., Fu, G., & Zuo, S. (2010b). A compact printed monopole antenna for WLAN and WiMAX applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(4), 857–861. <https://doi.org/10.1002/mop.25060>



cosecha de energía electromagnética radiada.

**Edison Andrés, Zapata Ochoa,** Obtuvo el título de ingeniero de Telecomunicaciones en el año 2018. Es Magister en Automatización y Control Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín Colombia. Sus temas de interés están enfocados en el diseño y análisis de antenas para



semiconductoras, específicamente en el estudio del factor g de Landé. En 2008 realizó una pasantía en la UNICAMP estudiando las propiedades ópticas de heteroestructuras semiconductoras. Desde el 2009 él está vinculado como Investigador en el Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM, Medellín Colombia.

**Francisco Eugenio, López Giraldo,** Obtuvo su grado de Física en 2003, su grado de Maestría en física 2007 y su título de Doctor en física en 2009 de la Universidad de Antioquia, Colombia. Durante sus estudios de doctorado estudio las propiedades ópticas y electrónicas en nanoestructuras



de interés se encuentran enfocadas en la investigación de comunicaciones ópticas y la gestión de la innovación tecnológica.

**Vanessa García, Pineda,** Es ingeniera de telecomunicaciones y Magister en Gestión de Innovación Tecnológica, Cooperación y Desarrollo Regional del Instituto Tecnológico Metropolitano. Actualmente es docente investigadora tiempo completo de la Corporación Universitaria Americana. Sus principales áreas



# Estudio Experimental de Conectores Tipo Ángulo en Vigas Compuestas de Acero y Hormigón

Cárdenas, Fausto<sup>1</sup> ; Villegas, José<sup>1</sup> ; Hernández Rodríguez, Luis Tinerfe<sup>2\*</sup> ; Guaminga, Edwin<sup>2</sup> ; Herrera, Melisa<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional, Centro de Investigación de la Vivienda, Quito, Ecuador

**Resumen:** Esta investigación técnico experimental tiene como objetivo analizar la resistencia a corte, considerando que para los perfiles laminados tipo ángulo no se cuenta con una fórmula de cálculo normalizada al emplearse como conectores de corte y que pueden ser usados en secciones compuestas. El estudio consistió en el análisis de 16 especímenes; 8 con un ángulo de 3 mm de espesor y otras 8 con 4 mm de espesor; cada grupo de 8 especímenes se dividió en dos subgrupos de 4, que se diferencian entre sí por la posición del conector a 45 y 90 grados. Al comparar los resultados con estudios de otros autores, se evidencia que el modo de falla está relacionado con la forma de la probeta, lo cual resulta en una falla prematura del concreto sobre las nervaduras. El análisis de estos ensayos resultó en la obtención de parámetros como: resistencia, ductilidad, deslizamiento y rigidez del material; independientemente de la orientación del conector, y se concluyó que el conector orientado a 90 grados es el que mayor carga resiste. En cuanto a la rigidez, los valores obtenidos son similares con investigaciones previas, lo que lleva a la conclusión que el conector orientado a 45 grados tiene una mayor rigidez característica que el orientado a 90 grados. Los mismos, según la norma establecida, tienen una ductilidad moderada y según las gráficas carga-deslizamiento los de 3 mm de espesor tienen un mayor desplazamiento que los de 4 mm, independientemente de su orientación.

**Palabras clave:** conector de corte ángulo, losa deck, resistencia a corte, ensayo push out

## Experimental Study of Angle Type Connectors in Steel and Concrete Composite Beams

**Abstract:** This experimental technical research aims to analyze the shear resistance, considering that there is no standardized calculation formula for angle rolled shaped when used as shear connectors and that they can be used in composite sections. The study consisted of the analysis of 16 specimens; 8 with a 3 mm thick angle and another 8 with 4 mm thickness, each group of 8 specimens was divided into two subgroups of 4, which differ from each other by the position of the connector at 45 and 90 degrees. When the results are compared with studies by other authors, it is evident that the failure mode is related to the shape of the specimen, resulting in premature failure of the concrete on the ribs. The analysis of these tests resulted in obtaining parameters such as strength, ductility, sliding and rigidity of the material, regardless of the orientation of the connector. This led to the conclusion that the connector oriented at 90 degrees is the one that resists the greatest load. Regarding stiffness, the values obtained are similar to previous investigations, concluding that the connector oriented at 45 degrees has a greater characteristic stiffness than the one oriented at 90 degrees. According to the established standard, they have a moderate ductility and according to the load-slip graphs, those of 3 mm thickness have a greater displacement than those of 4 mm, regardless of their orientation.

**Keywords:** angle shear connector, deck slab, push out test, shear strength

### 1. INTRODUCCIÓN

El origen de la construcción mixta, combinando acero y hormigón, encuentra su origen en la década de 1920, muchos

\*luis.hernandezr@epn.edu.ec

Recibido: 22/08/2023

Aceptado: 01/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.06

CC 4.0

investigadores concluyeron que al trabajar en conjunto estos materiales resistían cargas mayores en comparación a la construcción tradicional (Hidalgo, 2017). Para optimizar parámetros económicos y por ende el peso de la estructura, en la actualidad se ha optado por construir parte de los edificios con estructuras mixtas de hormigón y acero. Uno de los parámetros a tomar en cuenta en este tipo de construcción es el comportamiento y la unión entre los dos materiales con conectores (Chacón, 2012).

El estudio del conector tipo ángulo nace por la necesidad de buscar variantes más factibles a ser usadas con menos tecnología y fácil colocación, así como mano de obra menos calificada disminuyendo los costos. Estos han sido estudiados por diversos autores con la finalidad de incluirlos en la construcción y se ha realizado variaciones no solo la geometría, sino también el posicionamiento del mismo. Investigaciones recientes han demostrado que un perfil angular es resistente a cortante y además, la simplicidad de este conector ha permitido su uso en el mercado latinoamericano, ya que facilita la construcción de secciones compuestas (Chacón, 2012).

Estudios realizados por Khorramian et al. (2015) determinaron el comportamiento del conector tipo ángulo en una posición inclinada y descubrieron diferencias con aquellos conectores posicionados sin ningún grado de inclinación. Los resultados indicaron que, al tener menos inclinación, los conectores presentan fallas más abruptas, lo cual resulta no solo en rotura del concreto, sino también en fractura del conector. Se concluye que para mayores cargas la probeta con menor inclinación sufría mayores deslizamientos.

Investigaciones realizadas por Shariati et al. (2016) determinaron el comportamiento del conector tipo ángulo mediante una orientación en forma de V para analizar tanto la resistencia de la carga máxima como la ductilidad. Se encontraron dos tipos de falla, la fractura en el conector y el fisuramiento del hormigón. La falla de fractura en el conector sucedió en todos los especímenes bajo cargas de fatiga, lo que demuestra que la falla después de ciclos de carga y descarga tiene menos ductilidad comparado con la carga monotónica y se concluye que el hormigón presenta más grietas cuando el conector es de mayor longitud.

Shariati et al. (2016) consideraron la norma europea Eurocode 4 (2016), y establecieron que el conector es dúctil si la capacidad de deslizamiento es igual o mayor a 6 mm. Además, analizaron las gráficas carga-deslizamiento en su investigación y demostraron que todas sus probetas se consideraron dúctiles, ya que los resultados están en un rango de cercano a los 6 mm. Bezerra et al. (2018) estudiaron un nuevo tipo de unión en forma de V. Esto fue concebido para confinar el concreto en un área de contacto frontal más grande y ser fácil de instalar y construir. Con más área de contacto, el conector propuesto distribuye la fuerza de corte más uniformemente, evitando alta concentración de esfuerzos en comparación con la opción del perno, también tiene un mayor momento de inercia y es menos flexible que estos últimos bajo flexión.

Para construir los especímenes requeridos para los ensayos Push out, se consideró lo reglamentado en la norma ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS (2015) y normas internacionales aplicables en el Ecuador como el Eurocode 4 (2016), ACI 318-19 (2019), ANSI/AISC 341-22 (2022) y ANSI/AISC 360-22 (2022), las cuales describen los parámetros y requerimientos de materiales para su correcta implementación en campo. El hormigón y el acero serán los materiales utilizados para construirlos, mientras que la madera se utilizó en los encofrados.

## 2. METODOLOGÍA

La propuesta para esta investigación es la prueba más utilizada en base a múltiples estudios y hallazgos desde 1956, el ensayo denominado Push out, el cual se desarrolla aplicando cargas axiales sobre perfiles metálicos conectados a dos losetas deck, las que transfieren esfuerzos a los conectores y dando como resultado fallas en el hormigón, tanto a compresión como a tensión (Bouchair et al., 2012). Este tipo de ensayo sirve para comprender los valores la carga, ductilidad del perfil compuesto y el comportamiento del conector (Hurtado et al., 2008).

Los especímenes para este estudio constan de 16 probetas en total, cada uno con dos losas de hormigón que contienen lámina deck de 0.76 mm de espesor y malla electrosoldada de 4 mm de diámetro espaciadas a 100 mm. Estos especímenes están conformados por vigas metálicas tipo I 200x100x5 mm soldadas a conectores de ángulo de 4 mm y 3 mm de espesor con posiciones de 45 y 90 grados respectivamente. La distribución de los 16 especímenes según el espesor del conector y la orientación se detalla en la Tabla 1, donde  $f'_c$  corresponde a la resistencia especificada del hormigón a compresión. Todas las dimensiones de los especímenes se muestran en la Figura 1, mismas que están regidas por la norma Eurocode 4 (2016).

Tabla 1. Cantidad de especímenes

$f'_c$ (MPa)	Espesor (mm)	Orientación (grados)	Nombre de la muestra	Número probetas
28	3	45	A1-45-3 mm	4
28	3	90	B1-90-3 mm	4
28	4	45	C1-45-4 mm	4
28	4	90	D1-90-4 mm	4
Total probetas				16

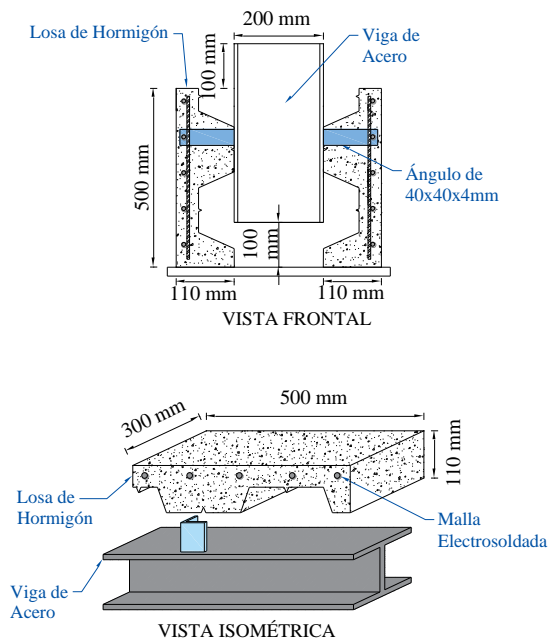
### 2.1. Ensayo Push out

Para los ensayos Push out, se consideran las disposiciones del Eurocode 4 (2016) que abarca como considerar las cargas cíclicas y monotónicas, dimensiones de las probetas, losa de hormigón y sección del acero. En este ensayo, una carga vertical se aplica sobre la probeta a través de un gato hidráulico, la cual se transmite a la placa, lo que hace que la conexión trabaje a cortante. La probeta se coloca sobre una placa base que es a la vez horizontal y restringe la probeta por desplazamiento lateral debido a la fuerza aplicada. Para



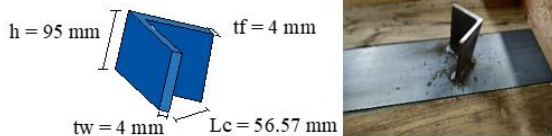
comprobar que sean correctos los cálculos realizados al conseguir la máxima resistencia teórica, se realiza un ensayo monotónico en uno de los especímenes y luego se compara este resultado con el resultado teórico.

a)



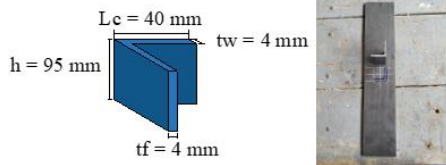
b)

POSICIÓN A 45°



c)

POSICIÓN A 90°



**Figura 1.** Dimensiones de las probetas de ensayo  
 a) Dimensiones de la viga y la losa de hormigón  
 b) Dimensiones del conector colocado a 45°  
 c) Dimensiones del conector colocado a 90°

En el ensayo monotónico, se debe verificar que el espécimen debe fallar después de los 15 minutos de iniciada la prueba (Eurocode 4, 2016). Para garantizar esto, se siguió el método utilizado por Ayala & Chicaiza (2021), donde se calculó una variación de la carga constante durante el tiempo de ensayo, con el objetivo de aumentarla de forma constante cada 1 minuto, utilizando la Ecuación 1.

$$\Delta F_u = \frac{P_u}{t} \quad (1)$$

Siendo:

$\Delta F_u$ : Carga para cada tiempo de 1 minuto (kN).

$P_u$ : Carga última teórica (kN).

$t$ : Tiempo estimado que dura el ensayo (minutos) [ $t > 15$  min].

Para el ensayo de carga cíclica, se utiliza como referencia el valor de la carga de rotura en el ensayo de carga monotónica,

se calcula el 5 % y el 40 % de esta en cada posición del conector de corte como se plantea en Eurocode 4 (2016). En la realización de esta prueba se carga y descarga el espécimen durante 25 ciclos entre esos rangos predeterminados del 5 % y el 40 %. El ciclo 26 se carga la probeta de tal forma que la rotura no ocurra en un tiempo menor a 15 minutos.

## 2.2. Hormigón

La resistencia a la compresión del hormigón depende del tipo y calidad del agregado y de la relación que exista en la mezcla del agua con respecto al cemento y con la reacción de estos componentes se obtiene un material de alta resistencia (Luna, 2014). Para obtener una resistencia del concreto de 28 MPa, se optó por costear un metro cúbico de concreto de la empresa Holcim con las propiedades de resistencia y asentamiento requeridas. La norma INEN-1855 (2015) determina las especificaciones de la correcta preparación y suministro del hormigón no endurecido al usuario.

Se realizaron un total de 15 cilindros de concreto con pruebas de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión, programadas según la norma prescrita INEN-1573 (2010). La resistencia del hormigón a la compresión fue 29.73 MPa a los 28 días después y el módulo de elasticidad a los 56 días fue 21 882.33 MPa.

## 2.3. Acero

Se deben analizar y determinar varias pruebas sobre el acero estructural conforme con los grados utilizados. Según Eurocode 4 (2016), los ensayos múltiples de conectores de acero deben tener como objetivo determinar: la resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y fluencia, a través de un diagrama de esfuerzo típico en función de la deformación del acero.

Se ensayaron tres muestras de acero de cada espesor del conector ángulo, obteniéndose resistencias a la tracción ( $F_u$ ) de 460.5 MPa para los conectores de 3 mm y 482.6 MPa para los de 4 mm. Una vez que se evaluaron los resultados de las muestras de 3 mm y 4 mm, se hizo evidente que ninguna de ellas tenía un error porcentual superior al 10 %, y se comprobó estadísticamente que el resultado era válido.

La viga metálica fue diseñada de forma que no fallara a compresión axial durante el ensayo, ya que el objetivo era determinar la capacidad resistente del conector, por lo que debía ser la conexión la que fallara. Para esto se consideró lo reglamentado en ANSI/AISC 360-22 (2022) y los criterios sismo resistentes de la ANSI/AISC 341-22 (2022).

## 2.4. Malla electrosoldada

De acuerdo con los datos de los especímenes y siguiendo la norma ACI 318-19 (2019), se coloca un refuerzo mínimo de 4 mm de diámetro en toda el área de la losa y de acuerdo a lo que dicta el reglamento el espaciamiento máximo no supera las 5 veces del espesor de la losa por lo que se concluye que las varillas son colocadas cada 100 mm en toda su área.

Para evitar la rotura o agrietamientos en la sección del hormigón, se colocó la malla de refuerzo electrosoldada con un recubrimiento predominante de 25 mm del borde superior de la losa, todo esto dentro de los rangos permisibles que especifica la norma ANSI/AISC 360-22 (2022).

### 2.5. Instrumentación del ensayo

Con base en estudios previos sobre conectores de cortante y considerando la importancia de medir los desplazamientos entre losas y vigas, como se orienta en Eurocode 4 (2016), se determinó la ubicación óptima para colocar los dispositivos de medición de desplazamiento posicionadas en el centro de la viga y en el centro de cada losa. Los datos de carga se obtuvieron de celdas de carga y el desplazamiento de la losa en relación con el de la viga se obtuvo con los transductores de desplazamiento de variación lineal (LVDT). Se colocaron un total de 5 LVDT, 2 a los lados de las placas de la prensa hidráulica, 2 en la parte superior de cada losa y 1 en el alma de la viga.

La instrumentación para el ensayo de las probetas consiste en una prensa universal empleada para aplicarle carga y cinco transductores diferenciales de variación lineal, los cuales se ubican estratégicamente para obtener datos del desplazamiento lineal que se producen en esos puntos. Con este criterio los LVDT 1 y 2 miden el desplazamiento de la viga, los LVDT 3 y 4 miden el desplazamiento de las losas de hormigón y el LVDT 5 mide el desplazamiento del alma de la viga en el centro.

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Falla del hormigón

Los 16 especímenes durante la prueba de Push out dieron como resultado una falla prematura muy específica del concreto con grietas transversales en la nervadura inferior como se puede apreciar en la Figura 2.



**Figura 2.** Fallo del hormigón.  
a) Rotura del hormigón en la probeta C1-45-4 mm.  
b) Rotura del hormigón en la probeta D1-90-4 mm.

utilizar un arriostramiento lateral para tratar de evitar la rotura prematura en el hormigón, sin embargo, se evidenció que dichas fallas transversales eran observables a tan solo el 35 % de la carga última en varias muestras. De acuerdo con Hicks (2017), la única forma de evitar la falla prematura es aplicar fuerzas normales transversales a la superficie de la losa, y que estas fuerzas distribuidas no superen el 10 % de las fuerzas longitudinales, ya que estos resultados fueron utilizados en investigaciones previas de conectores tipo perno en la ANSI/AISC 360-22 (2022).

### 3.2. Carga-Deslizamiento

Los datos producto de los ensayos de carga son tratados con la finalidad de obtener no solo los deslizamientos a cada lado de la probeta, sino también para determinar la rigidez, ductilidad y disipación de energía. Los resultados de los ensayos monotónicos para obtener la curva de las cargas con sus respectivos desplazamientos se exponen en la Tabla 2, donde  $P_u$  es la carga última aplicada y  $\delta_u$  el desplazamiento.

**Tabla 2.** Resultados de ensayos monotónicos

Probeta	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)
A4-45-3 mm	87.694	11.544
B4-90-3 mm	92.488	11.201
C4-45-4 mm	102.431	3.930
D4-90-4 mm	105.865	6.990

Los ensayos cíclicos son realizados una vez que se haya concluido con los ensayos monotónicos con ciclos de cargas dentro de los límites del 5 % y 40 % de la carga monotónica máxima y en este rango de valores se producen las curvas de histéresis. En las gráficas de la Figura 3, se aprecia que las probetas que soportaron mayores cargas durante los ensayos son las que tienen un conector de 4 mm de espesor y además orientado a 90 grados. La gráfica de histéresis presentada en Figura 4, representa el comportamiento del conector bajo cargas de fatiga.

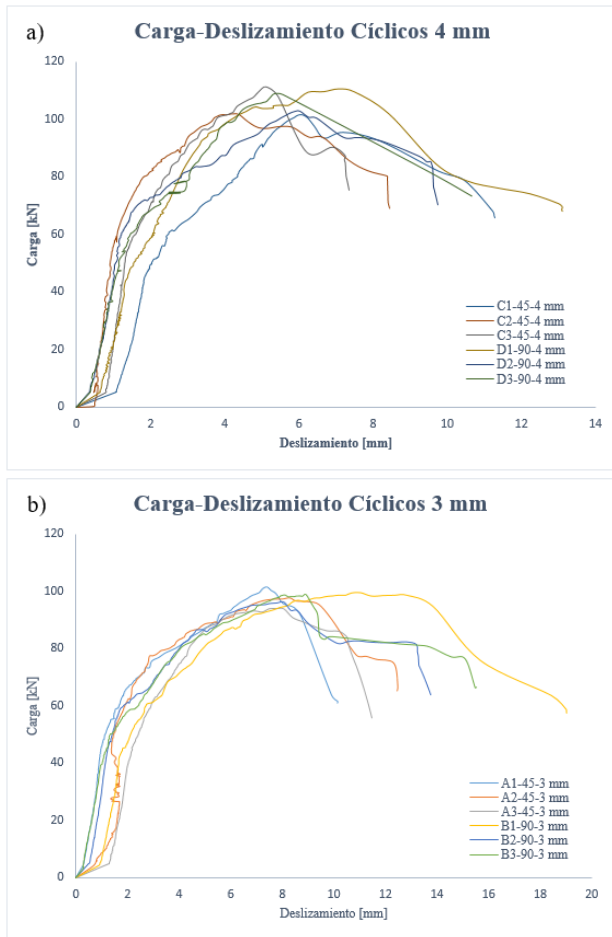
### 3.3. Resistencia y deslizamiento característico

El Eurocode 4 (2016) indica una metodología para hallar el valor correspondiente de  $P_{Rk}$ , el cual se corresponde con el 90 % de la menor carga de falla en la gráfica carga-deslizamiento. Los valores de carga última ( $P_u$ ) y desplazamiento ( $\delta_u$ ) para cada probeta no deberán exceder el 10 % de la media aritmética ( $P_{um}$  y  $\delta_{um}$ ) respectivamente, por lo que deberán estar dentro de ciertos límites comprendidos entre la media aumentada en un 10 % y el valor de la media disminuida en un 10 %. Estos deberán cumplir con las condiciones expuestas en las ecuaciones (2) y (3). El Eurocode 4 (2016) plantea que el deslizamiento característico ( $\delta_{uk}$ ) es el valor menor de todos los  $\delta_u$  de los especímenes, corregido y reducido en un 10 %.

$$0.90 \cdot P_{um} \leq P_u \leq 1.10 \cdot P_{um} \quad (2)$$

$$0.90 \cdot \delta_{um} \leq \delta_u \leq 1.10 \cdot \delta_{um} \quad (3)$$

Con base en estudios previos, en esta investigación se optó por



**Figura 3.** Curvas Carga-Deslizamiento.

- a) Carga-Deslizamiento Cíclicos de conector de 4 mm
- b) Carga-Deslizamiento Cíclicos de conector de 3 mm

### 3.4. Resistencia de diseño

El análisis del modo de falla se hace una vez que se han realizado todos los ensayos de las probetas. Para evaluar y obtener la resistencia de diseño del conector ( $P_{Rd}$ ) debe observarse si el fallo se produce en el conector o en el hormigón, siendo en este caso, mayoritariamente producidos en el hormigón, por lo que la resistencia de las probetas dependía de éste, y se calculó la resistencia de diseño con la Ecuación 4. Al formular la resistencia de diseño mediante la Ecuación 4, los resultados indican que cumplen con dicha condición en todos los especímenes con diferente orientación.

$$P_{Rd} = \frac{f'_{ck}}{f'_{cm}} \cdot \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \quad (4)$$

Siendo:

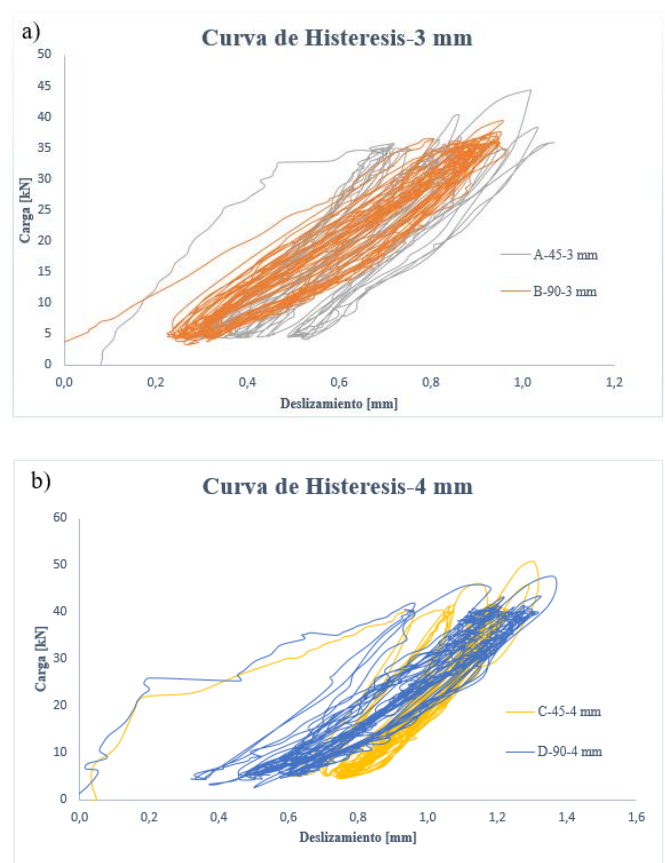
$P_{Rd}$ : Resistencia de diseño del conector.

$P_{Rk}$ : Resistencia característica.

$f'_{ck}$ : Resistencia especificada del concreto a compresión (MPa)

$f'_{cm}$ : Resistencia media del concreto a compresión obtenida de los ensayos (MPa).

$\gamma_V$ : Factor de seguridad parcial. El Eurocode 4 (2016) recomienda usar un  $\gamma_V = 1.25$



**Figura 4.** Curvas Histéresis

- a) Curva Histéresis conector de 3 mm
- b) Curva Histéresis conector de 4 mm

### 3.5. Rigidez característica $K_{Rk}$

De acuerdo con el Eurocode 4 (2016), para la determinación de la rigidez característica se emplea la Ecuación 5.

$$K_{Rk} = \frac{0.7 \cdot P_{Rk}}{s} \quad (5)$$

Siendo:

$K_{Rk}$ : Rigidez característica de conector (kN/mm).

$P_{Rk}$ : Resistencia característica (kN).

$s$ : Deslizamiento correspondiente a  $0.7 \cdot P_{Rk}$  (mm).

### 3.6. Ductilidad

Los cálculos previos y para clasificar los valores obtenidos del factor de ductilidad se hacen con base en la norma ASCE 41-17 (2017), que clasifica la demanda de ductilidad de una estructura como: baja, moderada o alta. De acuerdo con la clasificación, los resultados muestran que los conectores tienen una demanda de ductilidad moderada. Analizando los resultados, se puede apreciar que de acuerdo con la clasificación de Eurocode 4 (2016) los conectores de las probetas se consideran dúctiles conforme a los resultados del valor de  $\delta_{uk}$ , ya que está por encima de los 6 mm, excepto las probetas tipo C-45-4 mm.

### 3.7. Energía disipada

En el diseño sísmico de una edificación, es muy importante determinar la disipación de energía ( $\mu$ ) ya que indica cómo se puede llegar a comportar ante un evento de gran magnitud. Su determinación se hace calculando el área bajo la curva en las gráficas de carga-deslizamiento y se realizó mediante el método de los trapecios, en donde se sustituye el área bajo la curva por trapecios rectángulos de anchura infinitesimal y altura correspondiente a la abscisa de la curva. Se realiza la sumatoria de las áreas infinitesimales y se obtiene la energía disipada.

A partir de lo anterior y según las gráficas experimentales carga contra deslizamiento, se puede determinar la energía que disipa una estructura. Al utilizar la gráfica correspondiente al último ciclo y determinar el área bajo esa curva, se obtiene la capacidad de disipación de energía de esa estructura. La ductilidad en el acero está estrechamente relacionada con la energía disipada, ya que entre menos dúctil sea el acero, menor será la disipación de energía. Un resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 3.

### 3.8. Comparación con trabajos anteriores realizados en la Escuela Politécnica Nacional

Los resultados se comparan con probetas de ensayos de investigaciones anteriores que tienen similares características tanto en sus medidas, orientación del conector y espesor correspondiente. Las investigaciones por comparar con el presente estudio son aquellas investigaciones realizadas en la Escuela Politécnica Nacional (EPN). En la Figura 5, se compara con el trabajo de Cevallos & Mera (2022) y provee resultados específicamente para los especímenes con conectores de 3 mm de espesor y con orientación de 45 y 90 grados y por consiguiente en la Figura 6 se compara con la investigación de Valenzuela & Velasco (2021), las cuales muestran resultados con conectores de 4 mm con orientaciones similares.

### 3.9 Comparación con ecuaciones de diseño

Las ecuaciones de diseño teóricas presentadas en este estudio fueron tomadas de normativas internacionales, así como también las propuestas por diferentes autores. Para esto fueron seleccionadas dos normativas internacionales y dos investigaciones, las cuales son estudios relevantes en el tema en todos los casos.

De las normativas internacionales, se usa la ecuación del perfil canal de la norma canadiense CAN/CSA-S16-01 (2007) aplicada al ángulo para comparar con los resultados experimentales. De igual forma y con el mismo propósito, se utiliza la ecuación del perfil canal de la norma ANSI/AISC 360-22 (2022) aplicada al ángulo.

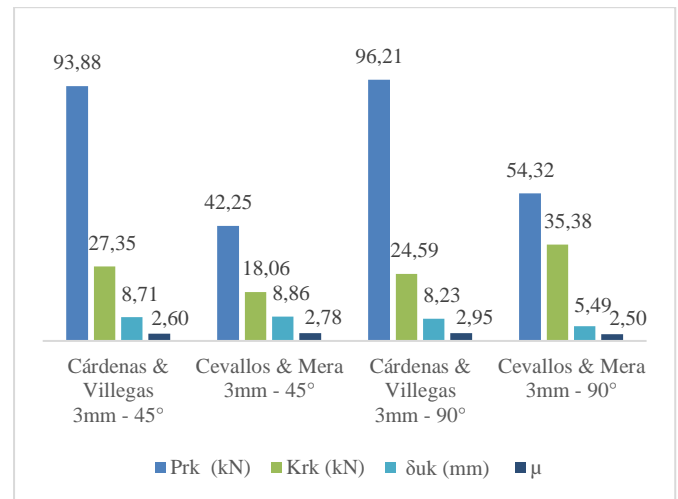


Figura 5. Gráficos de comparación de resultados conector de 3 mm con Cevallos y Mera

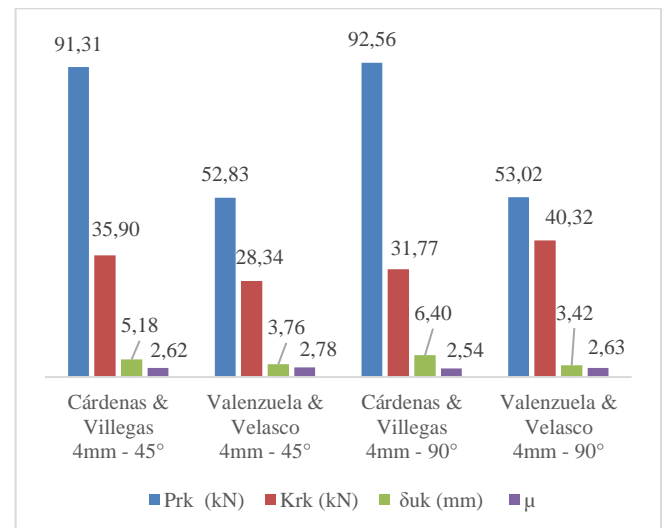


Figura 6. Gráficos de comparación de resultados conector de 4 mm con Valenzuela y Velasco

De las investigaciones previas realizadas, Soty & Shima (2013) en su estudio acerca de conectores de corte tipo ángulo y canal, proponen una ecuación que considera la longitud y altura del conector, así como la resistencia a compresión del hormigón y emplean un factor que relaciona el espesor y la altura del conector. Balasubramanian & Rajaram (2016), basados en ecuaciones del Eurocode 4, hicieron un estudio experimental del comportamiento del conector de corte en forma de ángulo y llegaron a su propia ecuación que considera longitud del conector y su altura embebida en la losa, así como la resistencia a compresión del hormigón.

Cabe destacar que los estudios y normativas tomadas en cuenta realizan los cálculos con otro tipo de conectores y con diferentes orientaciones a los usados en esta investigación, sin embargo, presentan características similares en las medidas y espesor del conector, así como también el tipo de losa. La comparación con otras ecuaciones de diseño se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Resumen de resultados

Probeta	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_{Rk}$ (kN)	$(\delta_{uk})$ (mm)	$K_{Rk}$ (kN)	$\mu$	$\mu$ (kN·mm)	$P_{Rd}$ (kN)
A-45-3 mm	93.88	8.71	84.49	7.84	27.35	2.60	1 219.24	62.42
B-90-3 mm	96.21	8.23	86.59	7.41	24.59	2.95	1 733.06	63.98
C-45-4 mm	101.45	5.76	91.31	5.18	35.90	2.62	1 020.17	67.46
D-90-4 mm	102.84	7.11	92.56	6.40	31.77	2.54	1 373.66	68.38

Tabla 4. Comparación de los resultados de  $P_u$  y  $P_{Rk}$  experimentales vs Ecuaciones de diseño teóricas

Probeta	$Q_n$ (kN)	Autor	$P_u$ (kN)	error (%)	$P_{Rk}$ (kN)	error (%)
			Monotónicos		cíclico	
A-45-3 mm	75.29	ANSI/AISC 360-22	87.69	14.15	84.49	10.89
	61.92	CAN/CSA-S16-01		29.39		26.71
	105.18	Soty & Shima		19.94		24.49
	132.16	Balasubramanian & Rajaram		50.70		56.42
	53.23	ANSI/AISC 360-22		42.45		38.53
B-90-3 mm	43.78	CAN/CSA-S16-01	92.49	52.66	86.59	49.44
	74.37	Soty & Shima		19.59		14.11
	93.45	Balasubramanian & Rajaram		1.04		7.92
	82.13	ANSI/AISC 360-22		19.82		10.05
	67.55	CAN/CSA-S16-01		34.05		26.02
C-45-4 mm	124.61	Soty & Shima	102.43	21.65	91.31	36.47
	132.16	Balasubramanian & Rajaram		29.02		44.74
	58.07	ANSI/AISC 360-22		45.15		37.26
	47.76	CAN/CSA-S16-01		54.89		48.40
	88.11	Soty & Shima		16.77		4.81
D-90-4 mm	93.45	Balasubramanian & Rajaram	105.87	11.73	92.56	0.96

#### 4. CONCLUSIONES

El modo de falla de las probetas tuvo que ver principalmente con la geometría de los especímenes, mas no con la resistencia del hormigón, las fisuras tuvieron la particularidad de presentarse en la mayoría de las probetas aproximadamente cuando la fuerza aplicada alcanzaba un 35 % de la carga última.

La orientación del conector de corte influye directamente en la resistencia de los mismos, esto coincide con conclusiones de trabajos anteriores comparados en las Figuras 5 y 6, siendo los conectores con una orientación de 90° los que mayor carga resisten.

La diferencia entre valores de carga para un mismo espesor y diferente orientación al compararlos con trabajos anteriores representados en las Figuras 5 y 6, se diferencian de manera considerable, que incluso se llega a duplicar, esto se debió a que en los anteriores ensayos no se usó un arriostramiento lateral reforzado permitiendo que los resultados no dicten una apreciación correcta.

Contrario a lo que sucede con la última carga, en donde los conectores de corte a 90° probaron soportar mayores cargas en los ensayos Push out, la rigidez característica en los conectores orientados a 45° es mayor que en los conectores soldados a 90°. Este hecho coincide con los resultados obtenidos en

investigaciones previas realizadas por Valenzuela & Velasco (2021) y Franco & Martínez (2020), aunque en este último se trata de una probeta de losa maciza.

De acuerdo con la clasificación de la ASCE 41-17 (2017), los resultados muestran que los conectores tienen una demanda de ductilidad moderada y al evaluar los resultados conforme al Eurocode 4 (2016) debido a que el deslizamiento característico está por encima de los 6 mm, excepto las probetas tipo C-45-4 mm cuyo valor de  $\delta_{uk} = 5.18$  mm, se clasifican como dúctiles.

En los ensayos monotónicos de conectores de 3 mm de espesor se evidenció que soportan una menor carga respecto a los conectores de 4 mm, sin embargo, estos primeros llegan a tener deslizamientos mayores debido a que tienen una ductilidad mayor.

Tal como se observa en la Figura 4, en las curvas de histéresis de los dos tipos de conectores se presenta una alta rigidez inicial, manifestándose en el rango lineal con valores de deformación elástica que no superan 1 y 1.3 mm para los conectores de 3 y 4 mm respectivamente. Además, se presentan en esta etapa las fisuras del hormigón como mecanismo de falla de las probetas en estudio.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) y al Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional.

## REFERENCIAS

- ACI 318-19. (2019). *Requisito de Reglamento para Concreto Estructural y comentarios*, United States of America.
- ANSI/AISC 360-22. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings*, United States of America.
- ANSI/AISC 341-22. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, United States of America.
- ASCE 41-17. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, United States of America.
- Ayala, D., & Chicaiza, C. (2021). *Análisis de la influencia de los conectores de corte en la unión viga metálica y losas de hormigón armado*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21546>
- Balasubramanian, R., & Rajaram, B. (2016). Study on behaviour of angle shear connector in steel-concrete composite structures. *International Journal of Steel Structures*, 16(3), 807–811. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-0094-0>
- Bezerra, L. M., Cavalcante, O. O., Chater, L., & Bonilla, J. (2018). V-shaped shear connector for composite steel-concrete beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 150, 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.07.016>
- Bouchair, A., Bujnak, J., & Duratna, P. (2012). Connection in steel-concrete composite truss. *Procedia Engineering*, 40(30), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.062>
- CAN/CSA-S16-01. (2007). *A National Standard of Canada Limit States Design of Steel Structures*. Canadá.
- Cevallos, M., & Mera, J. (2022). *Análisis de la resistencia a corte de los conectores tipo ángulo de 3 milímetros de espesor en losas tipo deck sobre estructura metálica*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22280>
- Chacón, R. (2012). *Comportamiento de angulares como conectores de cortante en vigas de acero de sección compuesta*. (Vol. 1). [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. BIBDIGITAL. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/73646>
- Eurocode 4. (2016). *Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Norma europea.
- Franco, J., & Martínez, M. (2020). *Análisis de la resistencia a corte de los conectores tipo ángulo en losas de hormigón armado sobre estructura metálica*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21235>
- Hicks, S. (2017). Development of a new push test for Eurocode 4. *Conference Paper*. <https://www.researchgate.net/publication/343335835>
- Hidalgo, G. (2017). *Comportamiento de tubos cuadrados de acero laminado en frío como conectores de cortante en entrepisos con vigas de acero en sección compuesta*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. BIBDIGITAL <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/78325>
- Hurtado, X. F., Molina, M., & Linero, D. L. (2008). Comportamiento de conectores de cortante tipo tornillo de resistencia grado dos para un sistema de sección compuesta. *Rev. Ingeniería e Investigación*, 28(2), 4–14. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092007000200003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000200003)
- INEN-1573. (2010). *Hormigón de Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón de Cemento Hidráulico. Nte Inen, 1* (Primera Edición), <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1573.pdf>
- INEN-1855. (2015). *Hormigones, hormigon premezclado, requisitos*. <https://www.normalizacion.gob.ec>
- Khorramian, K., Maleki, S., Shariati, M., & Ramli Sulong, N. H. (2015). Behavior of tilted angle shear connectors. *Plos One* 10(12), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144288>
- Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón: Guía Didáctica para el diseño de mezclas*. Quito, Ecuador: L. Germán.
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*. Norma Ecuatoriana de la Construcción, MIDUVI, Ecuador.
- Shariati, M., Ramli Sulong, N. H., Shariati, A., & Khanouki, M. A. (2016). Behavior of V-shaped angle shear connectors: experimental and parametric study. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(9), 3909–3926. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0762-8>
- Soty, R., & Shima, H. (2013). Formulation for shear force-relative displacement relationship of L-shape shear connector in steel-concrete composite structures. *Engineering Structures*, 46, 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.003>
- Valenzuela, H., & Velasco, F. (2021). *Análisis de la resistencia a corte de los conectores tipo ángulo de 4 milímetros de espesor en losas tipo deck sobre estructura metálica*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22117>

**BIOGRAFRÍAS**

**Fausto Raúl, Cárdenas Villarruel**, se graduó de Ingeniero Civil con mención en Estructuras en la escuela Politécnica Nacional, ha colaborado en proyectos de investigación y análisis de ensayos de materiales y suelos, llevados a cabo en el Laboratorio de ensayo de materiales, suelos y rocas (LEMSUR) y en el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV).



**José Abdón, Villegas Estrada**, se graduó de Ingeniero Civil con mención en estructuras en la Escuela Politécnica Nacional, ha colaborado en proyectos de investigación de levantamiento, análisis y reforzamiento estructural para viviendas, llevados a cabo por el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV).



**Luis Tinerfe, Hernández Rodríguez**, es Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional desde septiembre 2016. Ingeniero Civil graduado en 1984 en Universidad de Camagüey, Cuba y Doctor en Ciencias Técnicas graduado en 2004 en Universidad Tecnológica de la Habana. Profesor Universidad de Camagüey 1984 al 2015 y Director Inversiones 1995 hasta 2001 y 2004 hasta 2007. Profesor Universidad Lueji ANKonde, Angola 2010 al 2013. Premio Relevante XV Fórum Nacional de Ciencia y Técnica. Cuba. 2007. Profesional de Alto Nivel UNAICC, Cuba. 2007. Director del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional del 2019 a 2022.



**Edwin Eduardo, Guaminga Pillajo** graduado de Ingeniero Civil en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador (2012); Diplomado en Análisis y Diseño de Estructuras por el Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha, (2015). Especialista en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, donde ha participado proyectos de vinculación

con la Sociedad. Ingeniero Estructural en Consultora ASTEC, Asesoría Técnica Cía. Ltda., en Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón (2013-2014). Fiscalización en Proyecto de Rehabilitación Vial Zonas Eloy Alfaro y Manuela Sáenz (2013). Profesional en Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas de la Escuela Politécnica Nacional (2011-2012).



**Melisa, Herrera**, se graduó de Ingeniera Civil con Mención en Estructuras en la Escuela Politécnica Nacional, tiene un Diplomado Superior en Análisis y Diseño de Estructuras con enfoque Sismo Resistente, del Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha y es egresada de la Maestría de Investigación en Ingeniería Civil mención Estructuras de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.





# A Systematic Literature Review about Sensors Systems and Applications for Livestock Vital Signs Monitoring

Navia, Marlon<sup>1\*</sup> ; Chancay-García, Leonardo<sup>1</sup> ; Cedeño-Sarmiento, Crithian<sup>1</sup> ; Mendoza-Briones, Douglas<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Manabí, Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicación, Portoviejo, Ecuador

**Abstract:** The use of Information and Communication Technologies (ICT) in livestock is not new; applications in this field cover from simple animal identification to complete traceability systems. The monitoring of vital signs of livestock is an issue of farming in which ICT is applied. This paper presents a systematic literature review of proposals for monitoring vital signs in different types of livestock. For this purpose, PRISMA methodology has been applied, with its three phases: Planning, Conducting, and Reporting. Papers from journals and conferences, between 2017 and 2023, have been considered. Long-range monitoring of signs, such as movement, geo-position, body temperature, or heart rate, are the main trends of the analyzed papers and commercial products. Therefore, there are opportunities for developing devices or products that monitor other vital signs, like blood pressure or blood oxygen saturation.

**Keywords:** Cattle monitoring, farming, PRISMA

## Revisión Sistemática de Literatura sobre Sistemas de Sensores para Monitorización de Signos Vitales en Ganado

**Resumen:** El uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la ganadería no es nuevo; las aplicaciones en este campo abarcan desde la simple identificación animal hasta sistemas completos de trazabilidad. La monitorización de signos vitales del ganado es uno de los aspectos de la ganadería en el que se aplican las TIC. Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura de propuestas para la monitorización de signos vitales en diferentes tipos de ganado. Para ello se ha aplicado la metodología PRISMA, con sus tres fases: Planificación, Ejecución y Reporte. Se han considerado artículos de revistas y congresos, entre 2017 y 2023. La principal tendencia de las publicaciones y productos comerciales analizados es el monitoreo de largo alcance de signos como movimiento, posición geográfica, temperatura corporal, o frecuencia cardiaca. Por lo tanto, existen oportunidades para desarrollar dispositivos o productos que monitoreen otros signos vitales, como la presión arterial o la saturación de oxígeno en la sangre.

**Palabras clave:** Monitorización de ganado, agricultura, PRISMA

### 1. INTRODUCTION

Livestock is one of the main economic activities in rural areas, whether in developed or developing countries. However, while the use of technology in this field is expected in the former, in the latter it is rare.

Livestock health is an important issue that affects farmers' productivity and finances. Livestock diseases not only affect the productive capacity of the animal but also imply additional expenses for treatment of the disease (Ibarra et al., 2023). On the other hand, improving livestock welfare can improve both their health and the quality of the products obtained from them (Orihuela, 2021).

In countries where the use of technologies for livestock is not usual, problems arise that require solutions. For example, in Ecuador, in 2020, there were more than 200,000 deaths from different causes (not slaughtered for consumption) and 91,889 abortions out of an approximate total of 4,486,020 existing cattle animals (INEC, 2020). Many of these deaths can be attributable to animal health problems, as indicated by other researchers (García-Márquez et al., 2023; Macías-Rioseco et al., 2020).

Applying ICT in this sector could help livestock producers solve problems like this. In Latin America, the potential of the application of ICT in the productive sector has already been analyzed previously (Vergara Villegas et al., 2021). In contrast, there are extensive proposals for platforms oriented

\*mnaviam@gmail.com

Recibido: 23/11/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.07

CC 4.0

to the rural sector, such as the one presented in Nigusie et al. (2020).

One way to contribute to the control of the health of livestock, and therefore to the productivity of the rural sector and the economy of farmers, is the proper monitoring of vital signs and behavior of animals. Although there are some commercial products in this sense, such as Icerobotics (n.d.), Allflex Livestock Intelligence (2024), Ixorigue n.d.) or Zoetis (2021), it is possible that they do not cover all the necessary parameters for adequate health control. Likewise, there are systems or devices proposed in the scientific literature that allow monitoring one or more constants or vital signs, focused on different types of livestock.

This paper presents a systematic literature review (SLR) on systems, applications or devices to monitor vital signs in livestock. The objective of this work is, however, to illustrate the state-of-the-art of this subject in recent years and, on the other hand, to analyze the trends and pending challenges in the subject, with a focus on livestock health. The rest of the article is organized as follows: Section 2 presents how the SRL was carried out. The following section shows and analyzes the results obtained, and in the last section, the conclusions of this work are presented.

## 2. RESEARCH METHODOLOGY

The methodology applied in this study is based in PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). To help us in the process, the online tool Parsifal (<https://parsif.al>) was used.

The review process had three main phases: Planning, Conducting, and Reporting (outlined in Figure 1), which are described below.

### 2.1 Planning the Review

Here, we prepared the protocol to follow along with the review. First, we determined the search PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context) keywords. These terms are shown next:

- Population: livestock, cattle, agriculture.
- Intervention: vital signs.
- Comparison: monitor, monitoring, platform, device.

We have used lists of keywords instead of synonyms. With the keywords listed, a base search string was elaborated, which is shown next: ("livestock" OR "cattle" OR "agriculture") AND ("vital signs") AND ("device" OR "monitor" OR "monitoring" OR "platform")

We defined five research questions (RQ), listed next:

- **RQ1.** What systems or devices exist for monitoring the vital signs of livestock?
- **RQ2.** What communication technologies are used by systems or devices for monitoring livestock vital signs?

- **RQ3.** What kind of livestock are these systems or devices focused on?
- **RQ4.** Are these systems or devices portable, mobile or fixed?
- **RQ5.** What signs do these systems or devices monitor?

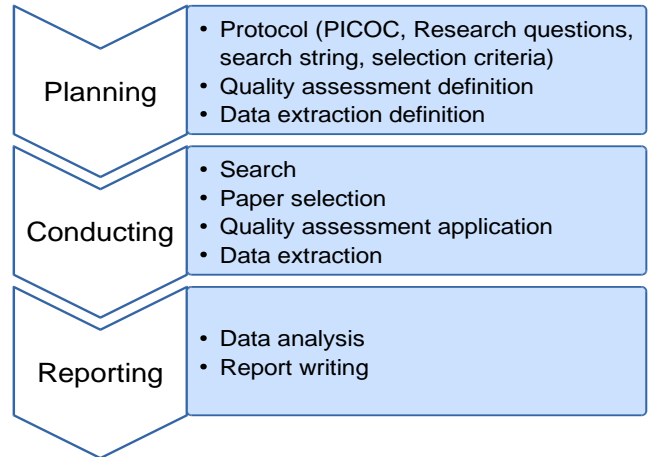


Figure 1. Review process scheme

The inclusion and exclusion criteria are described now. The inclusion criteria seek to retrieve papers from journals and conferences (proceedings), published from 2017 to July 2023, in English or Spanish languages. These last must have at least an abstract written in English.

Exclusion criteria are listed below and they are focused on discard incomplete, non-accessible, or non-novel publications, as well as which are about topics different than the planned:

- Abstracts, Books chapters, Early access, Editorials.
- Reviews
- Duplicated
- Non-accessible content
- Other language than english or Spanish
- Other topics

We defined three Quality Assessment Questions (QAQ) to determine the suitability of selected papers. These questions, listed below, helped us to find papers with relevant data in its content:

- **QAQ1.** Has the proposal been tested using real devices?
- **QAQ2.** Has the system been tested in real livestock?
- **QAQ3.** Does the document sufficiently describe the technical information about the implementation?

A paper is considered for the SLR if it gets at least 1.5 points in this assessment. The possible answers and weight of each QAQs were:

- *Yes*, with a weight of 1.
- *Partial*, with a weight of 0.5.
- *No*, with a weight of 0.

### 2.2 Conducting the review

For the review, five scientific databases were selected for the search: ACM Digital Library, IEEE Xplore, Science Direct, Scopus, and SpringerLink. Besides the base search string defined before, in each database it was necessary to adjust some search parameters (e.g. year range or type of publication).

**Table 1.** Data Extraction Form fields

Description	Type	RQ
ID	Number	-
Title	Text	RQ1
Year (of publication)	Number	-
Name of device/system/ platform	Text	RQ1
Communication technology	Text	RQ2
Kind of livestock	List (text)	RQ3
Portability	List (text)	RQ4
Monitored signs	List (text)	RQ5
Country of development	Text	-

After the search in each database was performed, a first selection of papers was determined according to selection criteria shown before. Next, the QAQs were applied to the selected papers. After that, data extraction was performed from the papers which obtained at least 1.5 points in quality assessment. Data fields for extraction are listed in Table 1.

### 2.3 Reporting the review

With the data extracted from the last selection, some analysis was performed. These analyses cover both technologies for communication and signs monitored in livestock, and they are shown in the next section.

In addition to papers found in the search, we made a brief analysis of commercial products available and promoted in Internet. After that we wrote this paper.

## 3. RESULTS

### 3.1 Paper selection and extraction

The results of database search are shown in Table 2. A total of 892 papers were found. For each database, the number of retrieved and selected papers is indicated. The first selection was based on inclusion and exclusion criteria. The second selection was based on quality assessment.

After applying selection criteria, 23 papers that accomplish with these criteria were selected. Then, the QAQ were applied to these papers, leaving only 21 papers selected for the study. The two discarded articles did not obtain the established cut-off score, because their focus was not on the presentation of a monitoring device or system. The extracted data is summarized in

**Table 3.** In this table, the column that corresponds to each RQ is marked as it.

### 3.2 Data analysis

In this subsection, the data fields corresponding to each RQ are considered for separated analysis.

**Table 2.** Papers retrieved and selected

Database	Retrieval	1st selection	2nd selection
ACM Digital Library	61	3	3
IEEE Xplore	6	1	1
Science Direct	379	3	1
Scopus	394	16	16
Springer Link	52	0	0

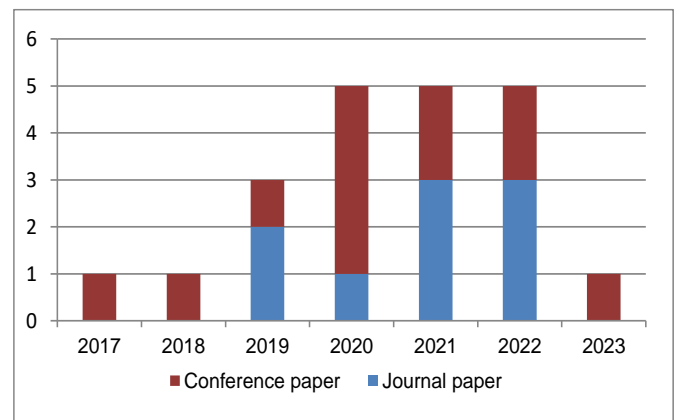
#### 3.2.1 RQ1: Found studies

The distribution of selected papers per year and per type of publication (journal or conference) is presented in Figure 1. We can appreciate an increment in recent years, compared with the first years considered in the study. The amount of papers according with type of publication is near: 9 journal papers and 12 conference papers, although its distribution along the time is not uniform. Starting in 2019, the number of proposals in this area has increased, coinciding with the importance that is beginning to be given to livestock welfare as a factor for productivity (Sinclair et al., 2019).

In Figure 2, the distribution of papers by country of origin is shown. Most of proposals are from Asian countries, led by China. Fewer publications are from America, a few from Europe, and none from the African continent.

#### 3.2.2 RQ2: Communication technologies

We found different options for device communication, from those developed for short distances, to the long-range ones. Figure 3 shows the amount of these technologies applied in the selected studies. Only two studies do not provide specific information about how it sends monitoring data, because these proposals do not consider data transmission.



**Figure 1.** Distribution of papers for each year

**Table 3.** Data extracted from selected papers

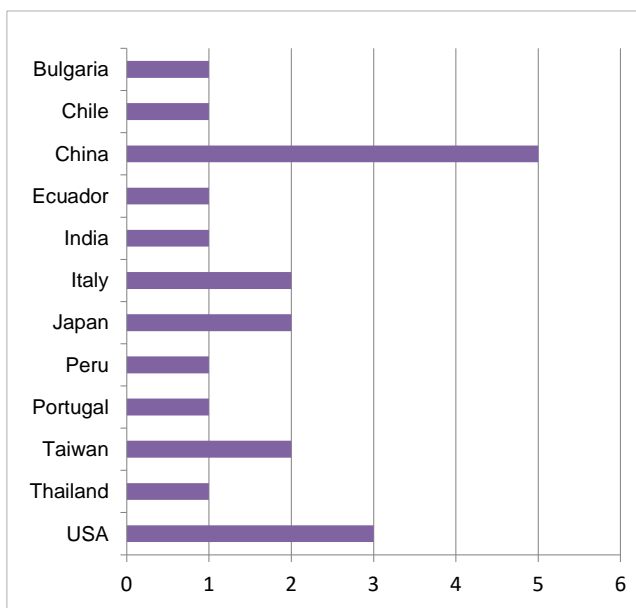
ID	Study (RQ1)	Country	Year	Communication Technology (RQ2)	Livestock (RQ3)	Portability (RQ4)	Monitored signs (RQ5)
1	(Tsenkov & Tsenev, 2017)	Bulgaria	2017	GSM/GPRS	Bovine	Fully mobile	Position, body temperature
2	(Li et al., 2018)	China	2018	LoRaWAN	Bovine	Fully mobile	Movement, position
3	(Hao et al., 2019)	China	2019	WiFi	Porcine	Portable	Respiration
4	(Germani et al., 2019)	Italy	2019	LoRaWAN	Bovine	Fully mobile	Movement, position, body temperature
5	(Quispe Bonilla et al., 2019)	Peru	2019	Serial	Bovine	Portable	Heart rate, respiration, body temperature
6	(Zhang et al., 2020)	China	2020	Bluetooth	Sheep	Fully mobile	Blood pressure, heart rate, body temperature, others
7	(Xia et al., 2020)	China	2020	WiFi	Bovine	Fully mobile	Body temperature, others
8	(Munoz et al., 2020)	Chile	2020	LoRaWAN	Bovine	Fully mobile	Position, others
9	(Luo et al., 2020)	Japan	2020	LoRaWAN and Zigbee	Bovine	Fully mobile	Movement, position, others
10	(Nootyaskool & Ounsrimung, 2020)	Thailand	2020	WiFi	Bovine	Fully mobile	Movement, body temperature, others
11	(Dos Reis et al., 2021)	USA	2021	LoraWAN	Sheep	Fully mobile	Movement, position, others
12	(Natori et al., 2021)	Japan	2021	XBee	Bovine	Fully mobile	Movement, position
13	(Joshitha et al., 2021)	India	2021	LoRaWAN	Bovine	Fully mobile	Environmental temperature/humidity, position
14	(Wang et al., 2021)	Taiwan	2021	N/A	Bovine	Portable	Body temperature
15	(Reigones & Gaspar, 2021)	Portugal	2021	Bluetooth	Equine and bovine	Fully mobile	Heart rate, movement
16	(Tuan et al., 2022)	Taiwan	2022	WiFi	Bovine	Fixed	Respiration
17	(Ojo et al., 2022)	Italy	2022	LoRaWAN	Sheep	Fully mobile	Movement, position
18	(Dong et al., 2022)	USA	2022	N/A	Porcine	Fixed	Heart rate, respiration
19	(Yang et al., 2022)	China	2022	LTE	Bovine	Fully mobile	Heart rate, position, body temperature
20	(Veintimilla et al., 2022)	USA	2022	LoRaWAN	Bovine	Fully mobile	Body temperature, position
21	(Miller et al., 2023)	USA	2023	WiFi	Equine	Fully mobile	Heart rate

N/A: Not available

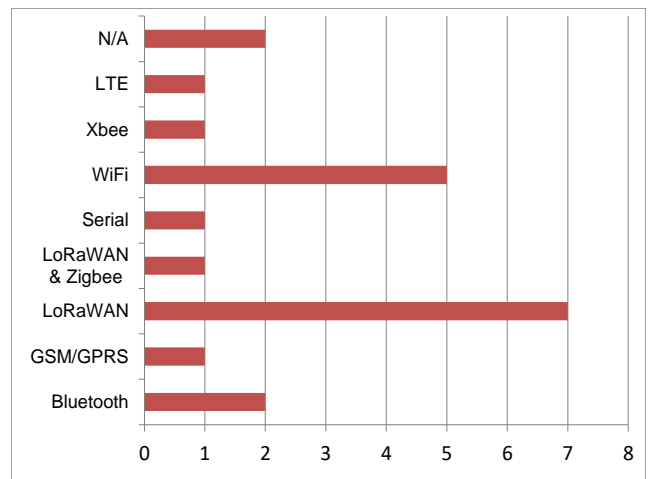
LoRaWAN: Long Range Wide Area Network

WiFi: Wireless Fidelity

LTE: Long Term Evolution



**Figure 2.** Distribution of papers by origin country



**Figure 3.** Communication's technologies used in found studies

Most studies use long-range technologies for data transmission, especially LoRaWAN. Wireless LAN technologies are the second most used, especially WiFi. These results show that the interest in livestock monitoring is not

limited to stables, but it is interesting when animals are in open or vast environments, e.g. in grasslands.

As is shown in Figure 3, short-range communication is few used in this kind of systems. However, it can be used combined with other long-range, such as it is done in Luo et al. (2020), where LoRaWAN and ZigBee are used together in different parts of the system.

3.2.3 RQ3: Kind of livestock

In Figure 4, the kind of livestock, target of monitoring in each study, is shown. The main kind of livestock considered in studies is bovine (beef cattle). It has sense because cows are source of several foods as milk and its derivatives, or meat; as well as leather, using in clothing (Prasad & Kothari, 2022).

Other hand, meanwhile most of studies are focused in a specific kind of livestock, one study (Reigones & Gaspar, 2021) presents a device for two types: cows and horses.

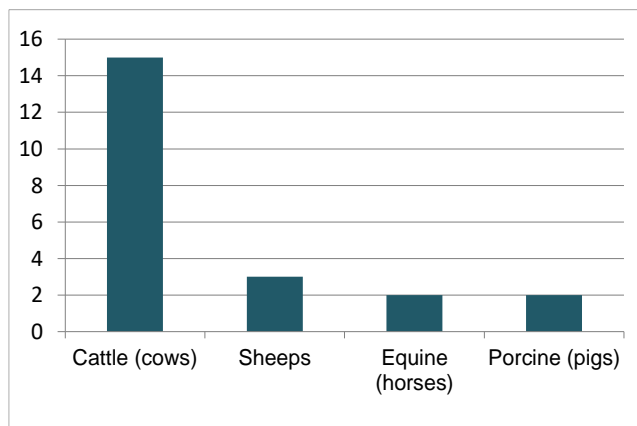


Figure 4. Kind of livestock target of studies

3.2.4 RQ4: Portability

We had considered three categories for portability feature:

- Fixed, when the monitoring device is in a static place, and it has to be unplugged from power to can be moved.
- Portable, if the device needs to be in a static position to work, but has a limited capacity of movement, without the need to unplug the power.
- Fully mobile, when de monitoring device is totally portable. Usually it uses batteries and is ported by the animal.

In Figure 5, the percentage of each category is shown. The preferred mode for monitoring is fully mobile. Thus, the device can be used by the animal at both indoor and outdoor environment, including in vast lands.

Three of proposals are considered portable. These devices are mainly used indoors, although also, in some cases, outdoors but with restrictions.

In only two proposals the monitoring device is fixed, and it is just for using in an indoor environment.

3.2.5 RQ5: Monitored sings

We have found several signs that are monitored by the selected studies. Figure 6 shows the frequency of each vital or behavior sign. The main parameter monitoring is the positioning or geo-location of the cattle, for which Global Positioning System (GPS) chips are used, although other positioning systems can be considered (Ojo et al., 2022). Main motivations for monitoring position are control (supervision) and security.

The second most monitored parameter is the livestock movement. For this aspect, accelerometer is the kind of sensor preferred. Almost all devices that include accelerometer are designed as a collar for neck, except by Reigones & Gaspar (2021) in that the collar is for heart-girth.

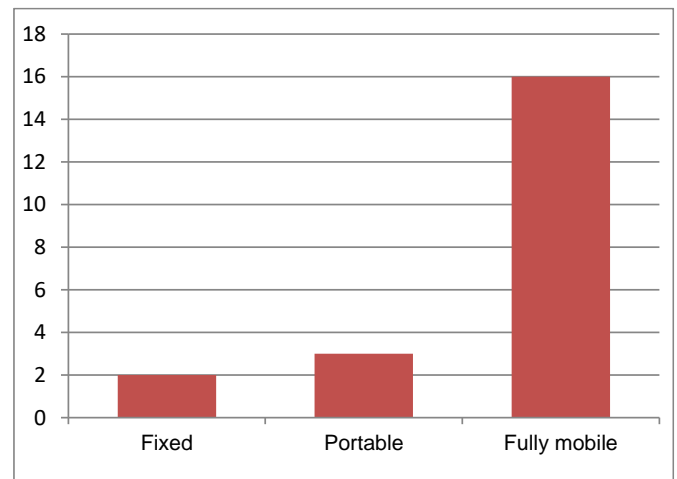


Figure 5. Portability of proposals

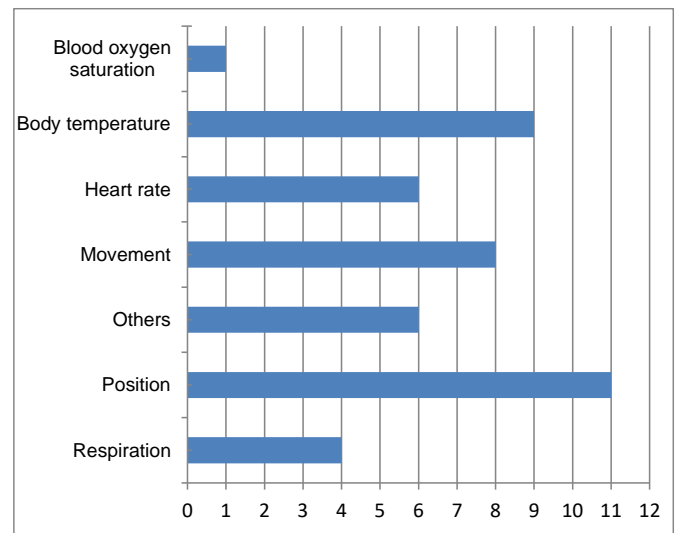


Figure 6. Sings monitored in selected studies

Even though movement, and therefore behavior, can be related to health of an animal, it needs to be completed with other parameters, in order to help farmers for monitoring and decision support (Neethirajan, 2020).

Body temperature is the most monitored internal sign. Here, the way of measurement can differ from one to other proposal, and includes thermal probes (Tsenkov & Tsenev, 2017), infrared sensors (Quispe Bonilla et al., 2019; Zhang et al., 2020), digital sensors (Germani et al., 2019; Nootyaskool & Ounsrimung, 2020; Veintimilla et al., 2022; Xia et al., 2020; Yang et al., 2022), and a combination of infrared thermography, anemometer and a humidity meter (Wang et al., 2021).

Heart rate is a vital sign considered by fewer studies. Here, there are different ways to measure this aspect: by using a data converter integrated circuit that register cardiac signals (Quispe Bonilla et al., 2019; Yang et al., 2022), an integrated pulse oximeter and heart rate monitor module (Zhang et al., 2020), an electrocardiography (ECG) sensor (Reigones & Gaspar, 2021), or with and photoplethysmography sensor (Miller et al., 2023). Besides the ways considered in these studies, there are other possibilities to monitor heart rate, e.g. photoplethysmographic imaging (PPGI), video-based motion, thermal imaging, among others (Nie et al., 2020). These techniques for heart rate measurement have been tested in other studies, for example by van der Kooij & Naber (2019), where PPGI is used in human tests; or by Fuentes et al. (2020), where machine learning is applied to thermal imaging for estimating vital signs measurement.

For respiration rate monitoring, we found two approaches. One is based on electromagnetic waves, WiFi dispersion (Hao et al., 2019), ground vibrations (Dong et al., 2022), or frequency modulated continuous wave (FMCW) radar (Tuan et al., 2022). Another approach uses the same integrated circuit that register cardiac signals (Quispe Bonilla et al., 2019). In the case of respiration rate, due to the relative error reported in cited researches, the monitoring must consider adequate measurement rates (Dißmann et al., 2022).

Blood oxygen saturation monitoring is considered in only one study. In Zhang et al. (2020), the same module selected to monitor heart rate can monitor blood oxygen saturation too.

In addition, other parameters have been considered by the proposals, some related to the livestock (such as the pH inside the cow, or the neck movement), and others related to the environment (distance from neck to the ground, noise, or environmental temperature and humidity).

### 3.2.6 Discussion and open challenges

As we can observe, most of studies considered in this SLR are focused on monitoring external parameters or signs of livestock (position and movement), which are related to their behavior. Therefore, there is an opportunity to develop other devices focused on monitor internal signals, such as blood oxygen saturation or blood pressure (the last one is no covered by analyzed studies).

Besides the proposals found in literature, there are commercial products for monitoring livestock, which are focused mainly in cows. The signs considered by these products are similar to found in this SLR, i.e. position or geolocation, movement and

body temperature. These products consist in a set of sensors, located most of them in a collar for neck (Afimilk, 2022; Allflex Livestock Intelligence, 2024; Ixorigue, n.d.), others in an ear tag (CowManager, 2024; Zoetis, 2021), or in a anklet for legs or pedometer (Icerobotics, n.d.). Only one of the found products was designed to be orally administered to the animal (Moonsyst, 2024).

Another aspect that we found is that almost all proposals and devices, from research or commercial, use batteries to operate. Only one proposal uses a solar panel to harvest energy. This issue should be covered in order to provide more autonomy to mobile monitoring devices.

On the other hand, novel sensor proposals exist and can be considered to its integration in monitoring devices (Wan et al., 2020). An adequate monitoring of vital signs in livestock can contribute to determine the health status of farm animals, or the influence of environmental conditions or factors on them (Anderson et al., 2021), or to contribute to prevent animal death (Kanz et al., 2020).

## 4. CONCLUSIONS

In this paper, a systematic review of proposals for monitoring vital signs on livestock has been done, by applying the PRISMA methodology.

The most used communication technology was of the WAN type, especially LoRaWAN, which shows that long-range livestock monitoring is the main trend. In case of type of livestock, cows are the most monitored, in both research proposals and commercial products.

The mobility of livestock is a very considered feature by monitoring proposals. Most of studies and all commercial products found are full portable devices.

Position (geolocation), movement and body temperature are the most monitored vital signs, again in both research proposals and commercial products. Other internal vital signs are less considered for monitoring.

There are opportunities for devices that monitor other internal vital signs, in addition to the considered in most of proposals, in order to obtain a more complete vision of livestock health. Furthermore, more devices, those which consider the energy harvesting for operating, need to be developed.

## REFERENCES

- Afimilk. (2022). *Cow Monitoring Solution*. Retrieved September 27, 2022, from <https://www.afimilk.com/cow-monitoring/>
- Allflex Livestock Intelligence. (2024). *Livestock Monitoring*. Retrieved September 27, 2022, from [https://www.allflex.global/na/product\\_cat/livestock-monitoring/](https://www.allflex.global/na/product_cat/livestock-monitoring/)
- Anderson, V., Leung, A. C. W., Mehdipoor, H., Jänicke, B., Milošević, D., Oliveira, A., Manavvi, S., Kabano, P., Dzyuban, Y., Aguilar, R., Agan, P. N., Kunda, J. J.,

- García-Chapeton, G., de França Carvalho Fonsêca, V., Nascimento, S. T., & Zurita-Milla, R. (2021). Technological opportunities for sensing of the health effects of weather and climate change: a state-of-the-art-review. *International Journal of Biometeorology*, 65(6), 779–803. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02063-z>
- CowManager. (2024). *Ahead of the herd together*. Retrieved September 27, 2022, from <https://www.cowmanager.com/>
- Dißmann, L., Heinicke, J., Jensen, K. C., Amon, T., & Hoffmann, G. (2022). How should the respiration rate be counted in cattle? *Veterinary Research Communications*, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11259-022-09984-7>
- Dong, Y., Codling, J. R., Rohrer, G., Miles, J., Sharma, S., Brown-Brandl, T., Zhang, P., & Noh, H. Y. (2022). PigV2: Monitoring Pig Vital Signs through Ground Vibrations Induced by Heartbeat and Respiration. *Proceedings of the Twentieth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 1102–1108. <https://doi.org/10.1145/3560905.3568416>
- Dos Reis, B. R., Easton, Z., White, R. R., & Fuka, D. (2021). A LoRa sensor network for monitoring pastured livestock location and activity. *Translational Animal Science*, 5(2), 1–9. <https://doi.org/10.1093/tas/txab010>
- Fuentes, S., Gonzalez Viejo, C., Chauhan, S. S., Joy, A., Tongson, E., & Dunshea, F. R. (2020). Non-Invasive Sheep Biometrics Obtained by Computer Vision Algorithms and Machine Learning Modeling Using Integrated Visible/Infrared Thermal Cameras. *Sensors*, 20(21), 6334. <https://doi.org/10.3390/s20216334>
- García-Márquez, L. J., Pérez-González, J., Ruiz-Ramírez, J., & Macedo-Barragán, R. (2023). Causas y factores de riesgo asociados a la mortalidad pre-destete de terneros en hatos bovinos de doble propósito en Colima, México. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 34(1), e23243. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i1.23243>
- Germani, L., Mecarelli, V., Baruffa, G., Rugini, L., & Frescura, F. (2019). An IoT Architecture for Continuous Livestock Monitoring Using LoRa LPWAN. *Electronics*, 8(12), 1435. <https://doi.org/10.3390/electronics8121435>
- Hao, Y., Li, J., Wang, W., & Lin, Q. (2019). An Animal Respiration Monitoring System Based on Channel State Information of Wi-Fi Network. *Proceedings of the 2019 7th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City*, 283–289. <https://doi.org/10.1145/3377170.3377196>
- Ibarra, M., Campos, M., Ibarra, C., Gladys, U., Huera, D., Gutiérrez, M., Chamorro, A., & Núñez, L. (2023). Financial Losses Associated with Bovine Brucellosis (*Brucella abortus*) in Carchi-Ecuador. *Open Journal of Animal Sciences*, 13(02), 205–216. <https://doi.org/10.4236/ojas.2023.132015>
- Icerobotics. (n.d.). *CowAlert*. N/D. Retrieved September 27, 2022, from <https://www.icerobotics.com/cowalert/>
- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). (2020). *Censo Nacional Agropecuario*. <https://www.ecuadrencifras.gob.ec/censo-nacional-agropecuario/>
- Ixorigue. (n.d.). *Collares GPS para monitorización de ganado*. Retrieved September 27, 2022, from <https://ixorigue.com/>
- Joshitha, C., Kanakaraja, P., Bhavani, M. D., Raman, Y. N. V., & Sravani, T. (2021). LoRaWAN based Cattle Monitoring Smart System. *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 548–552. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383749>
- Kanz, P., Gusterer, E., Krieger, S., Schweinzer, V., Süß, D., Drillich, M., & Iwersen, M. (2020). Pulsoximetric monitoring of fetal arterial oxygen saturation and fetal pulse at stage II of labor to predict acidosis in newborn Holstein Friesian calves. *Theriogenology*, 142, 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.10.027>
- Li, Q., Liu, Z., & Xiao, J. (2018). A Data Collection Collar for Vital Signs of Cows on the Grassland Based on LoRa. *2018 IEEE 15th International Conference on E-Business Engineering (ICEBE)*, 213–217. <https://doi.org/10.1109/ICEBE.2018.00041>
- Luo, J., Ito, A., Sasaki, A., Hasegawa, M., Ashibe, S., Nagao, Y., Hiramatsu, Y., Torii, K., & Aoki, T. (2020). Sensor Network for Monitoring Livestock Behaviour. *2020 IEEE SENSORS, 2020-October*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278693>
- Macías-Rioseco, M., Silveira, C., Fraga, M., Casaux, L., Cabrera, A., Francia, M. E., Robello, C., Maya, L., Zarantonelli, L., Suanes, A., Colina, R., Buschiazzi, A., Giannitti, F., & Riet-Correa, F. (2020). Causes of abortion in dairy cows in Uruguay. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 40(5), 325–332. <https://doi.org/10.1590/1678-5150-pvb-6550>
- Miller, M., Byfield, R., Crosby, M., Schiltz, P., Johnson, P. J., & Lin, J. (2023). A wearable photoplethysmography sensor for non-invasive equine heart rate monitoring. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100264>
- Moonsyst. (2024). *Moonsyst cattle monitoring*. Retrieved September 27, 2022, from <https://moonsyst.com/home>
- Munoz, C., Huircan, J., Huenupan, F., & Cachana, P. (2020). PTZ camera tuning for real time monitoring of cows in grazing fields. *2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/LASCAS45839.2020.9068964>
- Natori, T., Oishi, Y., Tsuichihara, S., Takemura, H., & Aikawa, N. (2021). Development of activity collecting system for grazing cattle in vast land. *Electronics and Communications in Japan*, 104(2), 1–9. <https://doi.org/10.1002/ecj.12314>
- Neethirajan, S. (2020). Transforming the Adaptation Physiology of Farm Animals through Sensors. *Animals*, 10(9), 1512. <https://doi.org/10.3390/ani10091512>
- Nie, L., Berckmans, D., Wang, C., & Li, B. (2020). Is Continuous Heart Rate Monitoring of Livestock a Dream or Is It Realistic? A Review. *Sensors*, 20(8), 2291. <https://doi.org/10.3390/s20082291>
- Nigussie, E., Olwal, T. O., Lemma, A., Mekuria, F., & Peterson, B. (2020). IoT Architecture for Enhancing Rural Societal Services in Sub-Saharan Africa. *Procedia Computer Science*, 177, 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.045>
- Nootyaskool, S., & Ounsrimung, P. (2020). Smart Collar

- Design to Predict Cow Behavior. *2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 92–97. <https://doi.org/10.1109/JCSSE49651.2020.9268342>
- Ojo, M. O., Viola, I., Baratta, M., & Giordano, S. (2022). Practical Experiences of a Smart Livestock Location Monitoring System Leveraging GNSS, LoRaWAN and Cloud Services. *Sensors*, 22(1), 273. <https://doi.org/10.3390/s22010273>
- Orihuela, A. (2021). Review: Management of livestock behavior to improve welfare and production. *Animal*, 15, 100290. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100290>
- Prasad, A., & Kothari, N. (2022). Cow products: boon to human health and food security. *Tropical Animal Health and Production*, 54(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-03014-5>
- Quispe Bonilla, M., Poma Gutiérrez, A., Serrano-Arriezu, L., Led Ramos, S., & Quispe Peña, E. (2019). Diseño, desarrollo y evaluación preliminar de un novedoso monitor de signos vitales llevable para vacunos. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 30(1), 74–87. <https://doi.org/10.15381/rivep.v30i1.15684>
- Reigones, A. R., & Gaspar, P. D. (2021). Real-Time Vital Signs Monitoring System Towards Livestock Health Furtherance. *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 753–758. <https://doi.org/10.1109/ICICT50816.2021.9358658>
- Sinclair, M., Fryer, C., & Phillips, C. (2019). The Benefits of Improving Animal Welfare from the Perspective of Livestock Stakeholders across Asia. *Animals*, 9(4), 123. <https://doi.org/10.3390/ani9040123>
- Tsenkov, Y., & Tsenev, V. (2017). Continuous analysis of free-roaming animals' behavior with ear-tag device. *2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2017.8000993>
- Tuan, S.-A., Rustia, D. J. A., Hsu, J.-T., & Lin, T.-T. (2022). Frequency modulated continuous wave radar-based system for monitoring dairy cow respiration rate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106913. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106913>
- van der Kooij, K. M., & Naber, M. (2019). An open-source remote heart rate imaging method with practical apparatus and algorithms. *Behavior Research Methods*, 51(5), 2106–2119. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01256-8>
- Veintimilla, J., Huerta, M., & Castillo-Velazquez, J.-I. (2022). Development of System for Monitoring and Geopositioning for Cattle Using IoT. *2022 IEEE ANDESCON*, 5, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON56260.2022.9989658>
- Vergara Villegas, O. O., Nandayapa, M., Sossa Azuela, J. H., Cossio Franco, E. G., & Rubin Linares, G. T. (2021). Artificial Intelligence for Industry 4.0 in Iberoamerica. *Computación y Sistemas*, 25(4), 761–773. <https://doi.org/10.13053/cys-25-4-4056>
- Wan, H., Zhuang, L., Pan, Y., Gao, F., Tu, J., Zhang, B., & Wang, P. (2020). Biomedical sensors. In David Dagan Feng (Ed.), *Biomedical Information Technology* (Second, pp. 51–79). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816034-3.00002-X>
- Wang, F. K., Shih, J. Y., Juan, P. H., Su, Y. C., & Wang, Y. C. (2021). Non-invasive cattle body temperature measurement using infrared thermography and auxiliary sensors. *Sensors*, 21(7). <https://doi.org/10.3390/s21072425>
- Xia, L., Chunxia, S., & Ming, T. (2020). Design and Implementation of Intelligent Ear Tag for Dairy Cows in Farms. *Proceedings of the 2020 9th International Conference on Software and Computer Applications*, 297–301. <https://doi.org/10.1145/3384544.3384574>
- Yang, Z., Chen, P., Li, Z., Wu, Y., He, Y., Wang, K., Chen, X., Chen, Y., & Xu, Z. (2022). Intelligent livestock nameplate based on STM32. *Proceedings of the 2022 4th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, 907–912. <https://doi.org/10.1145/3584376.3584538>
- Zhang, M., Feng, H., Luo, H., Li, Z., & Zhang, X. (2020). Comfort and health evaluation of live mutton sheep during the transportation based on wearable multi-sensor system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176(May), 105632. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105632>
- Zoetis. (2021). *Hert Monitoring Software SMARTBOW*. Retrieved September 27, 2022, from <https://www.smartbow.com/en/>

## BIOGRAPHIES



**Marlon, Navia**, received the B.Eng. degree in Informatics Systems from the Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, and the M.S. degree in Computer Engineering and the Ph.D. degree in Informatics from the Universitat Politècnica de València, Spain. He has been university professor since 2008, and he has led a

research group by four years. His research interests include wireless sensor networks, computer networks, and the Internet of Things.



**Leonardo, Chancay-García**, has a B.Eng. degree in Informatics Systems from the Universidad Técnica de Manabí; a M.S. degree in Computer and Networks Engineering, and a Ph.D. degree in Informatics from the Universitat Politècnica de València, Spain. He has several Publications of articles in indexed bases: Scopus and WoS. He has been Coordinator

and director of research projects and Professor at the Faculty of Informatics Sciences of the Universidad Técnica de Manabí.





**Cristhian, Cedeño-Sarmiento** has a M.S. degree in IT Auditing from the Espíritu Santo University of Specialties, specialized as an Information Security Auditor in the ISO 27001 standard by PECB, and he is currently training in project management with agile methodologies. Her research

interest focuses on the application of disruptive technologies to solve problems in society.



**Douglas, Mendoza-Briones** has a B. degree in Computer Science and a M.S. degree in Communications Networks with extensive experience in the field of information technology. He is teacher at the Universidad Técnica de Manabí., and is expert in application development, design and administration of networks and

security. His current fields of interest and research are image processing algorithms, machine learning, neural networks and computer vision.



# Replacement of Fine Aggregate with Refractory Brick Residue in Concrete Exposed to Elevated Temperatures

Bereche, Jhan<sup>1</sup> ; García, Juan<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Señor de Sipán, Faculty of Engineering, Architecture and Urbanism, Chiclayo, Peru

**Abstract:** Refractory brick waste, added to the fires originated in structures, makes it possible to bring together two problems to contribute to sustainable construction and introduce new aggregate alternatives in concrete. The objective of the study was to produce concrete with less fine aggregate and to evaluate a more sustainable concrete, using refractory brick residues (RBR) to replace fine aggregate in five percentages 10 %, 20 %, 30 %, 40 % and 50 % to be exposed to direct fire. The design was based on a water-cement w/c ratio of 0.71 and the production of 144 RBR-based concrete specimens. The fresh samples were subjected to slump and fresh unit weight tests, the cylindrical specimens prepared after 28 days of curing were subjected to compressive strength at room temperature and various temperatures (200 to 1 000 °C) for different times of 15, 30 and 60 minutes. In addition, a Three Factor statistical analysis of variance was performed with respect to the compressive strength at 28 days. The results showed that the RBR influences the concrete mix are less workable and reduce the fresh unit weight at higher substitution percentages. On the other hand, the ideal dosage was with the percentage of 40RBR as opposed to the other dosages subjected to heat, being insignificant at 15-minute exposure, but relevant at 30 and 60 minutes. It is concluded that RBR significantly influences the improvement of its mechanical properties under high heat and the amount of residues is limited to a specific dosage, providing a sustainable constructive approach to direct controlled fire exposures.

**Keyword:** Fire; concrete; refractory brick waste; temperature; times

## Reemplazo del Agregado Fino por Residuo de Ladrillo Refractario en Concreto Expuesto a Elevadas Temperaturas

**Resumen:** Los desechos de ladrillos refractarios, sumado a los incendios que se originan en las estructuras, hacen posible juntar dos problemáticas para contribuir a una construcción sustentable para introducir nuevas alternativas de áridos en el concreto. El objetivo del estudio fue producir concreto con menos agregado fino y evaluar un concreto más sostenible, utilizando residuos de ladrillos refractarios (RLR) para reemplazar el agregado fino en cinco porcentajes 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 % para ser expuestos a fuego directo. El diseño se basó en una relación agua-cemento a/c de 0.71 y en la elaboración de 144 probetas de hormigón a base de RLR. Las muestras frescas se sometieron a ensayos de asentamiento y peso unitario fresco, las probetas cilíndricas preparadas tras 28 días de curado se sometieron a resistencia a compresión a temperatura ambiente y diversas temperaturas (200 hasta 1 000 °C) durante diferentes tiempos de 15, 30 y 60 minutos. Además, se realizó un análisis estadístico de varianza de Tres Factores con respecto a la resistencia a compresión a los 28 días. Los resultados mostraron que el RLR influye en que la mezcla de hormigón sea menos trabajable y reduzca el peso unitario fresco a mayores porcentajes de sustitución. Por otro lado, la dosificación ideal fue con el porcentaje de 40RLR a diferencia de las otras dosis sometidas a calor, siendo insignificante la exposición de 15 minutos, pero si relevantes a 30 y 60 minutos. Se concluye que el RLR influye significativamente en la mejora de sus propiedades mecánicas sometidas al calor elevado y la cantidad de residuos se limita a una dosis específica, lo cual proporciona un enfoque constructivo sostenible frente a exposiciones de fuego directo controlado.

**Palabras clave:** Fuego; hormigón; residuos de ladrillos refractarios; temperatura; tiempos

### 1. INTRODUCTION

Globally, the materials used in construction are exposed to incidents such as high temperature fires (Aboutaleb et al., 2017; Humaish et al., 2020).

Fire poses a serious threat to the life of structures (Memon et al., 2019). Cases such as the Plasco Tower in Tehran was the victim of a catastrophic fire, perceiving lateral displacements and bending moments in pillars for 3 and a half hours, leading to its imminent collapse (Akbar et al., 2020; Da Silva et al.,

\*gchumacerojuanm@uss.edu.pe  
Recibido: 20/09/2023  
Aceptado: 27/02/2024  
Publicado en línea: 31/05/2024  
10.33333/rp.vol53n2.08

CC 4.0

2020). For they show the serious problem, it brings after a severe exposure to direct fire (Bo et al., 2020). Thus, above 300 °C, concrete loses almost 30 % of its original value; furthermore, in the temperature range of 400 to 800 °C, most of the initial strength is lost, and between 600 to 800 °C, the compressive strength was almost nil, as mentioned in Calmeiro and Correia (2014) and Han et al. (2020).

In the environmental aspect, the rapid increase in the amount of industrial waste is one of the main reasons that has led countries to adopt stricter environmental and sustainable policies (Sangi-Gonçalves et al., 2022). However, it is necessary to estimate the effect of the use of bricks as concrete aggregate to implement it as a component of concrete (Moreno et al., 2019). Thus, the total or partial substitution of this component is a key challenge to address the negative environmental effects and costs associated with the aggregate extraction process, without significantly affecting the properties of concrete and mortar manufactured with them (Feijoo et al., 2021). In Peru, refractory waste from the replacement of bricks from local metal smelters leads to the accumulation of these materials around cities and dumps.

In the compilation of literary information on topics related to refractory concretes, it is mentioned that they have an adequate performance at temperatures up to 1 000 °C, as expressed by Bareiro et al. (2020). However, this leads to mechanical deterioration at the structural level, due to spalling of the concrete when exposed to fire as mentioned Carrizo et al. (2020) and Ma et al. (2018). Even so, many Latin American countries persist in improving their structures in the face of these phenomena caused by various factors (Flores et al., 2018). Thus, it is important to consider studies on these issues, since concrete shows considerable reductions in strength and elasticity when subjected to earthquakes, fire or chemical interaction, as expressed by Galvez et al. (2020). Due to the fact that in Latin America, specifically in Peru, there is not much information on this type of concrete with refractory materials as a substitute for fine aggregate.

Likewise, there have been several researches that show the reuse of this material in the preparation of concrete, such as the research of Liu et al. (2018), where they tested the mechanical behavior of concrete after exposure to elevated temperatures up to 800 °C, obtaining optimum results. On the other hand, other studies used ultra-high performance fibers before and after heat treatment in a temperature range from 400 °C, 700 °C and 1 000 °C, achieving optimum residual strength in compression and flexure, being developed by Sobia et al. (2015) and Cruz et al. (2015).

According to studies by Baradaran and Nematzadeh (2017), it was concluded that workability is affected with doses of 25, 50, 75 and 100 % of refractory material, with slump ranging from 70 mm to 55 mm. On the other hand, the specific surface area of materials such as refractory brick powder is relevant when it is lower than that of cement to attribute a better workability in concrete as expressed by Sevim et al. (2023). Consequently, a level of flowability is achieved using superplasticizer (Shirani et al., 2021). On the other hand, the density reduction was affected using pumice from 12.3 % to

41.5 %, for the treatments from 25 % to 100 % pumice, respectively due to the porous structure of pumice, which translates into light weighting (Uysal et al., 2004). According to Zeghad et al. (2017), the results show that concretes made with refractory bricks based on silica-zirconium have a slightly higher density than other concretes, due to the specific mass of the brick. However, the use of recycled refractory brick aggregate shows a decrease with the increase of the maximum substitution ratio of 18 %, as expressed by Khattab and Hachemi (2021).

Within the mechanical properties such as compressive strength, concrete calcined under fire at 800 °C for 20 minutes showed a compressive strength loss rate of 66.3 % (Shui-Jun et al., 2013). The investigation of Molay et al. (2019), found that at 28 days the concrete with limestone, quartzite and granite subjected to 25 °C and 650 °C for 2 hours, it was observed that the concrete with granite had higher resistance at all temperatures compared to the concrete with quartzite and limestone (Tufail et al., 2017). In addition, the studies of Zeghad et al. (2017) observed that the concretes with alumina based on ground refractory bricks show a higher value of strength at 93 MPa, but not exceeding the standard sample of 120 MPa. Ahn et al. (2016), noted that the strength of concrete decreases as the exposure temperature increases, retaining 19.5 % and 51.7 % of the original strength after exposure to 800 °C. By substituting 50% of fine aggregate by refractory material, the residual strength of concrete exposed to 800 °C improves, but showed higher reduction values above 200 °C, as mentioned by Baradaran and Nematzadeh (2017). Also, Varona et al. (2018) clarify that lower residual strengths were obtained after exposure to higher mechanical test ages, making dehydration deterioration at elevated temperature more detrimental. Therefore, it is recommended to replace coarse and fine aggregate with 20 % refractory brick aggregate, for the use in the production of concrete at room temperature (Hachemi et al., 2023).

In this context, the objective of this research was to evaluate the influence of replacing fine aggregate with refractory bricks waste (RBR) on the compressive strength of structural concrete exposed to four different temperature ranges, every 3 time intervals, respectively. This type of concrete constitutes an environmental alternative to waste refractory bricks. On the other hand, although there are recent reviews on the use of refractory waste in construction, there is a knowledge gap because they do not highlight the effect at shorter exposure times; moreover, on the three-factor statistical analysis of variance with respect to compressive strength. Therefore, this study provides a synthesis of the results and, the possibility of establishing the use of this material in areas where the availability of natural aggregates is limited or impractical and, discuss the possibility of using this material against this uncontrolled occurrence of fire in a structure.

## 2. MATERIALS AND METHODOLOGY

### 2.1 Ordinary Portland Cement Type I

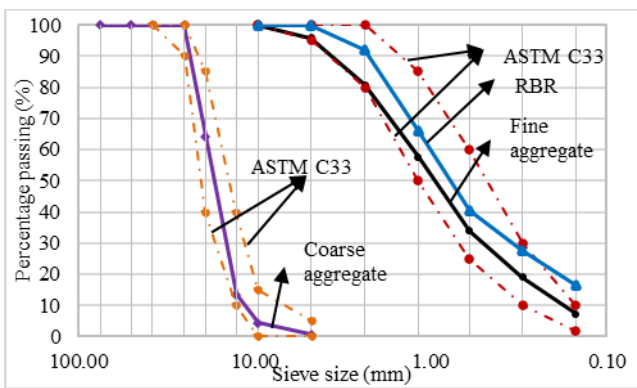
Type I ordinary Portland cement was used according to ASTM C150 (2012), as seen in Table 1, the chemical and physical analyses of the cement used are given, respectively.

**Table 1.** Chemical, physical and mechanical composition of Portland cement

Description	Specification	Manufacturer's results
MgO (%)	6.00 maximum	2.20
SO <sub>3</sub> (%)	3.00 maximum	2.70
Loss on ignition (%)	3.50 maximum	3.10
Specific weight	No specified	3.12
Setting time initial (minutes)	< 45 minimum	110
Setting time final (minutes)	> 375 maximum	238

2.2 Aggregates and refractory brick residue

Fine and coarse aggregate from the quarry bank of the Lambayeque region, Peru, were used. Additionally, refractory brick residue obtained from a local company was used as fine aggregate. Some of the physical properties are shown in Table 2, and the gradations of the aggregates under ASTM C136 (2001), are shown in Figure 1.



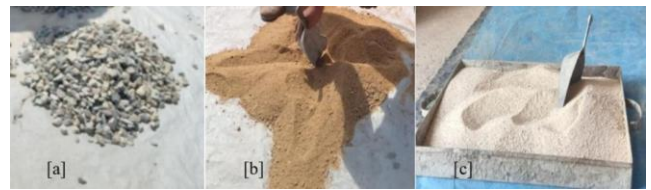
**Figure 1.** Coarse, fine and RBR aggregate granulometry

**Table 2.** Some properties of natural aggregates

Properties	Fine aggregate	Coarse aggregate	Refractory brick residue
Fineness modulus	3.05	---	2.57
Maximum size (mm)	---	19	---
Specific weight	2.51	2.69	2.34
Water absorption (%)	1.38	0.93	2.80
Moisture content (%)	0.98	1.21	0.33

2.3 Refractory brick residue

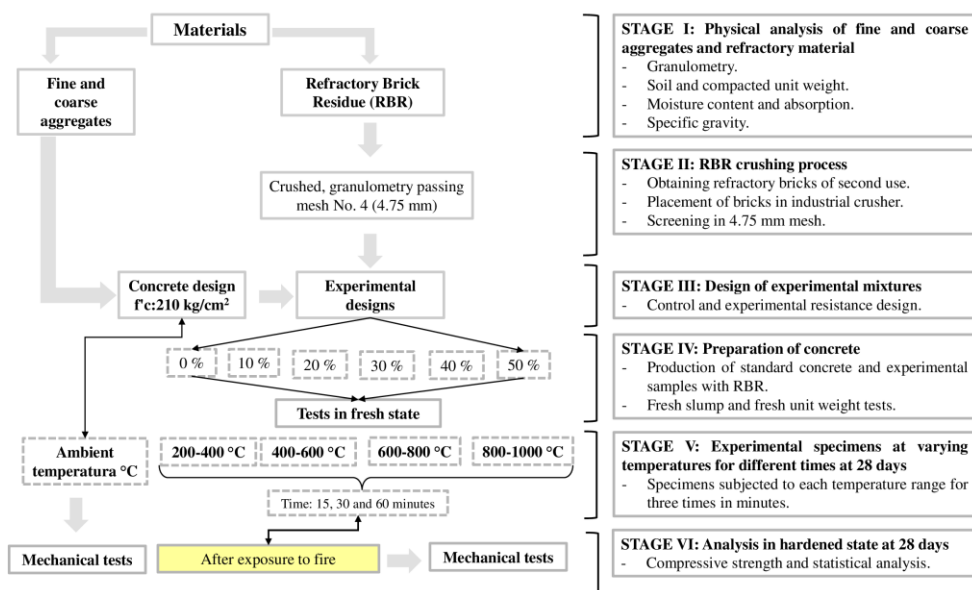
The refractory brick residue (RBR) was obtained from the recycling process of discarded refractory bricks from a metal smelting factory (used as lining). Figure 2 shows the different sizes of the aggregates used and of the refractory material itself.



**Figure 2.** a) Coarse aggregate, b) fine aggregate, c) refractory brick residue < 5 mm

2.4 Methodology

A control mix was made for a target strength of 210 kg/cm<sup>2</sup> with no replacement of refractory brick waste fine aggregate labeled RBR0 and five mixes with replacement levels of 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, and 50 % RBR labeled RBR10, RBR20, RBR30, RBR40, and RBR50, respectively according to American Concrete Institute 211.1 (1993) procedures. A constant water/cement (w/c) ratio of 0.71 was used and no superplasticizer was used in any of the mixes; the proportions are shown in Table 3. The research methodology is presented in a process flow diagram in Figure 3.



**Figure 3.** Research process flow

The natural aggregates and refractory brick residue particles were mixed in a dry state for approximately one minute, then cement was added and mixed for an additional one minute. Half of the mixing water was added to the mixer and mixed for an additional one minute. Subsequently, the specimens were demolded after one day of processing, then poured and cured

in water at room temperature by complete immersion until the day of testing under supervised conditions in accordance with the regulations (ASTM C192M, 2015). Likewise, three test bodies were considered to obtain a statistical average, corresponding to each test to be evaluated, to be subjected to curing for 28 consecutive days, respectively.

**Table 3.** Amount of materials per 1 m<sup>3</sup> of concrete

Labels	Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	RBR	w/c	<sup>a</sup> Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )
RBR0	395	282	838	863	Control	0.71	227
RBR10	395	282	754	863	84	0.71	203
RBR20	395	282	670	863	168	0.71	238
RBR30	395	282	587	863	251	0.71	239
RBR40	395	282	503	863	335	0.71	248
RBR50	395	282	419	863	419	0.71	246

<sup>a</sup> The compressive strength of the mixtures was obtained from unheated or room temperature specimens, at 28 days.

**2.5 Procedure for heating experimental samples**

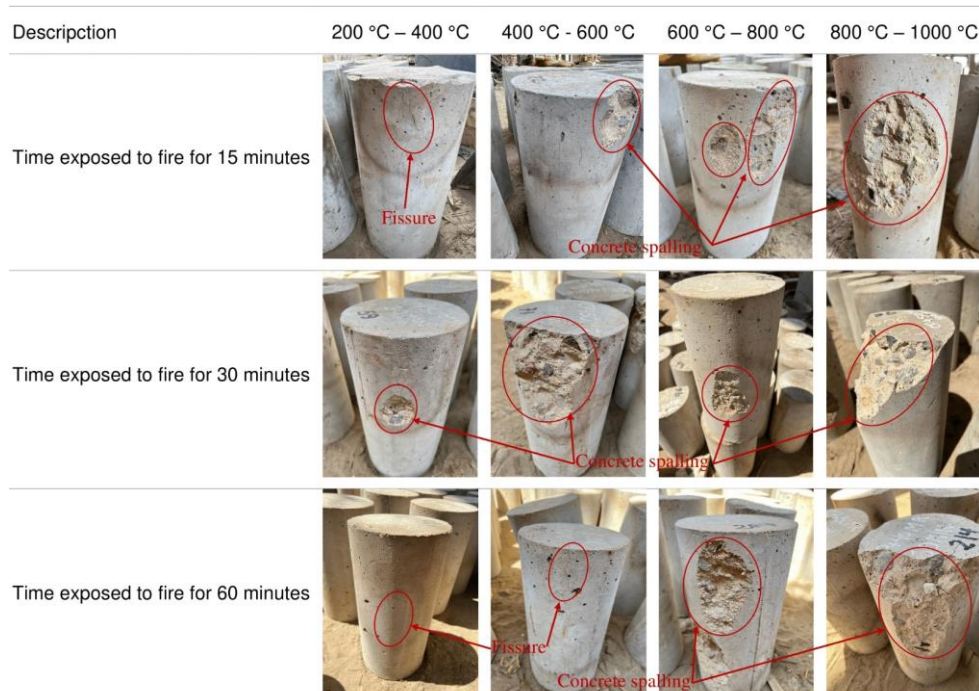
The specimens were placed coded in the ordered temperature ranges and according to the exposure time of study. The incineration process of the specimens was carried out under constant supervision. The artisanal kiln operated with high pressure burners, the heating capacity of the kiln was limited, the heating rate was 80 °C/min at the beginning.

The artisanal furnace was capable of reaching temperatures up to 1 250 °C, with dimensions of 5 000 mm (length) x 1 300 mm (width) x 500 mm (height), consisting of a body with refractory brick walls and a rigid steel lid with a layer of refractory sand, to avoid heat losses. The evaluation of the evolution over time of the temperature inside the furnace was measured with a thermocouple (maximum measurement of 1 200 °C).

It should be noted that more accelerated cooling (by cold water spray or water immersion) results in even lower residual properties. A quench was performed after 24 hours. After the incineration process of the modified concrete specimens, the textures, cracking and spalling of the mass of each specimen were observed, as shown in Figure 4.

**2.6 Experimental procedures**

The properties considered are the slump under international considerations (ASTM C143/C143M, 2012) using Abrams cone; unit weight (ASTM C138/C138M, 2014), using Washington pot equipment and Tests such as compressive strength according to parameters (ASTM C39M, 2014).



**Figure 4.** Texture of specimens against high temperature exposure

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1 Slump test

The workability was affected by the inclusion of RBR in the concrete mixes, since it is a material with low absorption and a surface texture different from that of sand, which caused it to cover a larger surface, thus reducing its workability. The slump result for the standard mix (RBR0) was 88.9 mm, while the slump values for RBR10, RBR20, RBR30, RBR40 and RBR50 were 88.9, 81.3, 76.2, 63.5 and 50.8 mm, respectively, the reduction range being between 0 and -42.85 %. In fact, as the RBR content increases, the slump of the mixture with refractory material decreases. In addition, the superplasticizer additive was not used in any experimental mixture, the results are shown in Table 4.

These results are similar to Baradaran and Nematzadeh (2017), workability was affected reporting similar significant reductions with slump ranging from 85, 70, 65, 60 and 55 mm as a function of replacing 0, 25, 50, 75 and 100 % refractory material in the concrete mix, respectively. Refractory brick dust is relevant when it is less than that of cement to attribute better workability in concrete (Sevim et al. (2023). Consequently, a level of flowability will be achieved by using superplasticizer (Shirani et al., 2021).

#### 3.2 Fresh unit weight test

Table 4 shows the results of the fresh unit weight sample where its internal behavior varies significantly with the inclusion of RBR. When compared with the control specimen and the experimental specimen with 10 % RBR, the density went from 2 372 to 2 345 kg/m<sup>3</sup>, a percentage change of -1.14 %, while with the maximum dose of 50 % RBR, it suffered a percentage change of -2.45 % with respect to the standard specimen. It should be clarified that the specific gravity of the refractory material was 2.34, being lower than the specific gravity of the fine aggregate, which was 2.51, directly influencing the density of the concrete.

As mentioned in Uyal et al. (2004), when adding other types of aggregates such as pumice in replacement doses every 25 % to 100 %, its density decreases to 1 329 kg/m<sup>3</sup> from 2 270 kg/m<sup>3</sup>, the value of the reference sample. Now using refractory brick, above 50 % substitution, the reduction in concrete density is less than 10 % (Khattab and Hachemi, 2021). The characteristics of refractory brick such as alumina-based, magsium-based or silica-zirconium-based give slightly higher density compared to conventional concrete (Zeghad et al., 2017).

**Table 4.** Effect of RBR on slump and unit fresh weight

Labels	Slump (mm)	Variation ± (%)	Unit fresh weight (kg/m <sup>3</sup> )	Variation ± (%)
RBR0	88.90	0	2 372	0
RBR10	88.90	0	2 345	-1.14
RBR20	81.30	-8.54	2 340	-1.35
RBR30	76.20	-14.28	2 329	-1.81
RBR40	63.50	-28.57	2 325	-1.98
RBR50	50.80	-42.85	2 314	-2.45

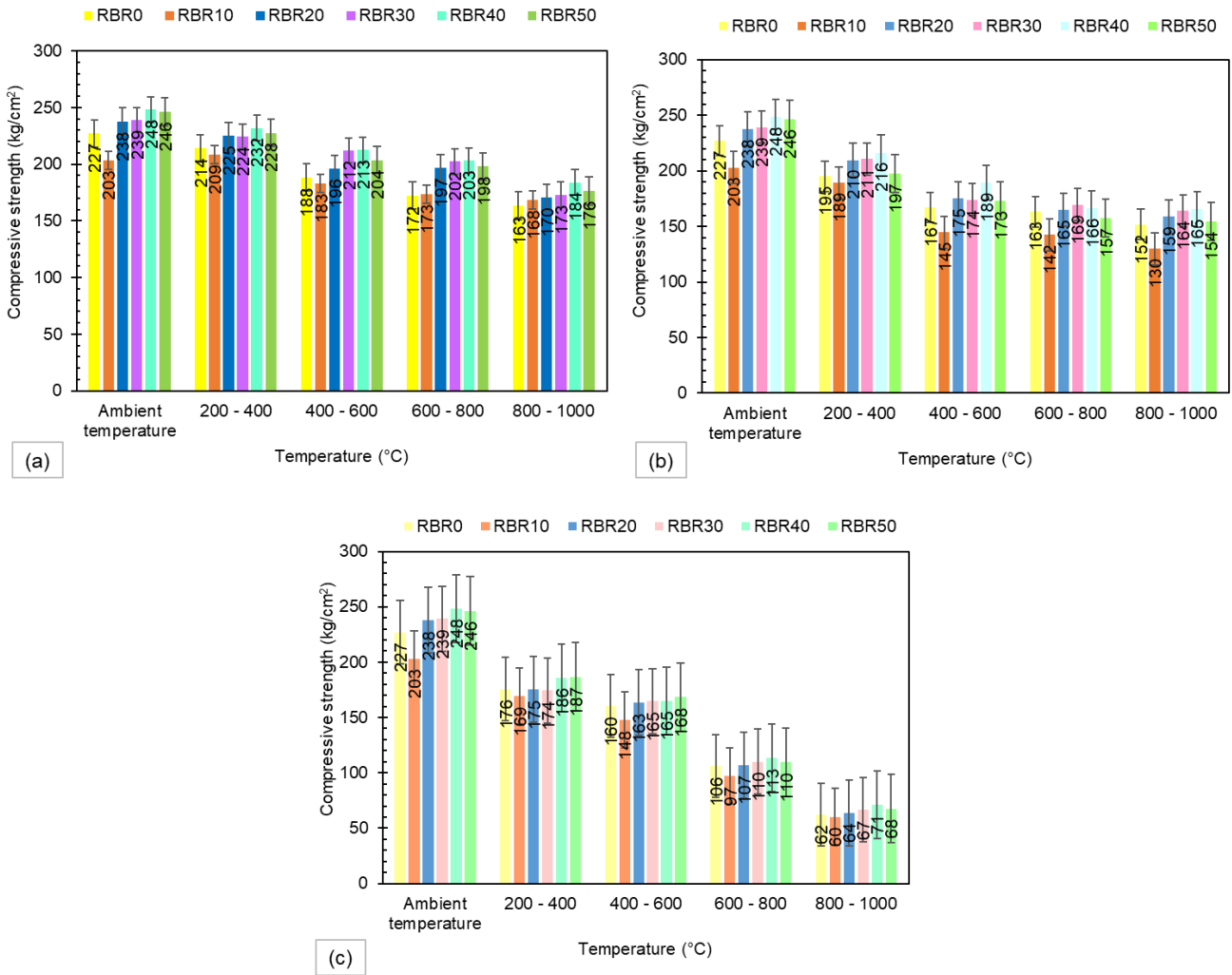
#### 3.3 Compressive strength

The compressive strength results were determined using the requirements of ASTM C39M, with specimens subjected to room temperature (Approx. 29 °C) and specimens with the effect of elevated temperatures after 28 days of curing as shown in Figure 5.

In Figure 5(a), the effect of RBR on the compressive strength subjected between 400 °C to 600 °C was observed, where less affectation was obtained in the specimens, they had a slight spalling after 5 minutes of being placed in the oven, this test group did not present abrupt explosions of the concrete mass and the cracking is faint in the external faces of each specimen. With the experimental samples of 10 % to 30 % of RBR, they represented resistance variations between 2.83 % and 12.57 %; however, with the samples of 40 % to 50 % of RBR, they suffer detachment of their mass in the middle zone of each specimen, but suffer resistance variations between 12.92 % and 8.14 % with respect to the sample RBR0. It is observed that during 15 minutes there is not much degradation of the concrete when exposed to fire, even between 800 - 1 000 °C the minimum resistance reaches 163 kg/cm<sup>2</sup> (RBR0) and the maximum of 184 kg/cm<sup>2</sup> (RBR40).

As shown in Figure 5(b), the results of the specimens exposed to 30 min times at different temperatures varied. The specimens with refractory material substitution are stronger than their control specimen, indeed the highest strength for specimen RBR40 was 189 kg/cm<sup>2</sup> (13.37 %), at the temperature range 400 - 600 °C. However, with ranges between 600 - 800 °C and 800 - 1 000 °C the strength increases are between 4 % and 9 %, respectively, for specimen RBR40. Similarly, it had results to investigations on fire calcined concrete at 800 °C in 20 min, where its compressive strength loss rate was 66.3 % (Sui-Jun et al., 2013). In Figure 5(c), it was observed that the experimental specimens at higher temperature for 60 minutes, the strengths had a maximum of 71 kg/cm<sup>2</sup> which represents 14.44 % with respect to the RBR0 sample. However, they already show a low resistance value compared to lower exposure times.

Regarding previous research on the use of aggregates as a substitute for other, Arioiz (2007) mentions that this reduction was very pronounced beyond 800 °C, the effects of the w/c ratio and the type of aggregate on the relative strength of concrete decreases as the exposure temperature increases, the effect of high temperatures on concrete strength was more pronounced for concrete mixes produced by river gravel aggregate. Meanwhile, the study shows that brick refractory in replacement of fine aggregate, indicates that it performs better than conventional aggregates. In other studies, Baradaran and Nematzadeh (2017) objects that the results showed that brick refractory aggregate and aluminate cement improve the residual compressive strength to double beyond the temperature of 800 °C.



**Figure 5.** Effect of RBR on the compressive strength of concrete exposed to high temperatures a) at 15 minutes of breakage, b) at 30 minutes of breakage, c) at 60 minutes of breakage

Results of studies indicate that concrete with aggregates fully or partially replaced with recycled concrete aggregate (RCA) exhibits good performance under elevated temperatures and can be considered comparable to conventional concrete, furthermore disintegration was observed when concrete with RCA was heated up to 750 °C. The results of residual mechanical properties tests show some variation between concretes made with different percentages of RCA substitution as focused by the studies of Sarhat and Sherwood (2013). However, research according to Abbu et al. (2022) constant the exposure of concrete to higher temperatures has two main effects on compressive strength: when lightweight concrete mixtures were heated to 250 °C and 350 °C, their strength increased; however, when heated to 450 °C, most of the mixtures lost some of their original strength.

3.4 Three-Factor Analysis of Variance statistical model

As shown in Figure 6, we know that the p-value of significance associated with the interaction of the three factors under study, recorded a value less than 0.05, ( $p = 6.18 \times 10^{-13} < 0.05$ ), affirming that there is a significant effect of the interaction of the three factors on the variable compressive strength, as well as the best combination of levels in the factors Time (minutes), Temperature and Mixture that maximizes the compressive strength based on the visualization of the box plot and the post hoc Tukey's multiple comparison post hoc test. Meanwhile, samples: RBR0, RBR10, RBR20, RBR30, RBR40, RBR50 for the statistical analysis respectively. The analysis corresponds to mix RBR40, at room temperature °C, at 15, 30 and 60 minutes, reaching an average resistance of 248.33 kg/cm<sup>2</sup> in each combination. The Three-Factor Analysis of Variance test was applied for compliance with normality of the residuals (Shapiro Wilk,  $p = 0.3943 > 0.05$ ), finding a significant effect in the interaction ( $p = 6.18 \times 10^{-13} < 0.05$ ).



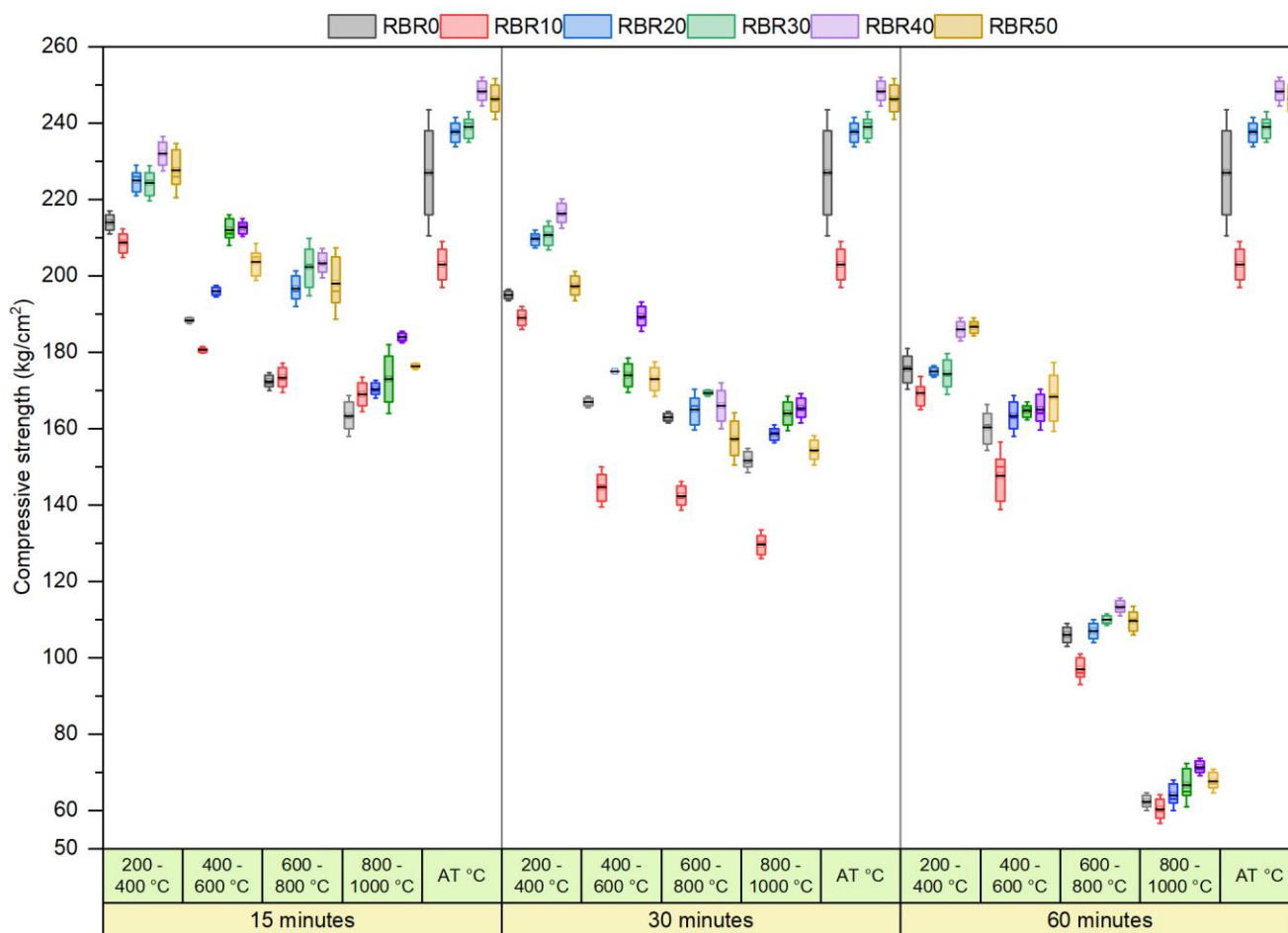


Figure 6. Box plots of compressive strength at 28 days, by treatment, temperature and time

#### 4. CONCLUSIONS

This research presents the results of an experimental study conducted to evaluate the influence of refractory brick waste as a replacement of fine aggregate for the production of structural concrete against exposure to high temperatures, showing relevant findings on the compressive strength of concrete against temperature ranges and exposure times. It also promotes the generation of research due to the lack of knowledge of this type of sustainable studies applied in Peru. Based on the results obtained in this study, the following conclusions can be drawn:

Workability and fresh unit weight were affected up to 50 % replacement of the refractory material. It is recommended that a superplasticizing admixture be used in future studies to improve workability so that it does not become a limiting factor in the application of the study.

It is concluded that from 20, 30 and 40 % RBR in concrete exposed at 800 – 1 000 °C had significant increases on compressive strength at 28 days. However, using doses of 10 and 50 % RBR, its compressive strength decreased below that of the control sample under room temperature as well as exposure to different temperatures.

As findings, it was observed that the low RBR content (up to 40 %) constitutes a technically viable alternative in the construction industry. In addition, the use of RBR has a sustainable impact to the extent that refractory brick waste is reused and overexploitation of fine aggregates from Peruvian quarries is avoided.

#### REFERENCES

- Abbu, M., Al-Attar, A. A., Alrahman, S. A., and Al-Gburi, M. (2022). The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1), 20220249. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0249>
- Aboutaleb, D., Safi, B., Crahour, K., and Belald, A. (2017). Use of refractory bricks as sand replacement in self-compacting mortar. *Cogent Engineering*, 4(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1360235>
- Ahn, Y., Jang, J., and Lee, H. (2016). Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 72, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.028>
- Akbar, A., Garivani, S., Shahmar, A., and Heshmati, M. (2020). Structural investigation of the collapse of the 16-story Plasco building due to fire. *Structural Design*

- of Tall and Special Buildings, 30(1), 1-20. <https://doi.org/10.1002/tal.1815>
- American Concrete Institute 211.1. (1993). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. In A. C. 211.1, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. United States: American Concrete Institute.
- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516-522. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.003>
- ASTM C136. (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM C138/C138M. (2014). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C143/C143M. (2012). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C150. (2012). Cement, Standard Specification for Portland. In A. C150, *Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM C192M. (2015). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM C39M. (2014). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Baradaran, A., and Nematzadeh, M. (2017). The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminate cement. *Construction and Building Materials*, 147, 865-875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.138>
- Bareiro, W., Silva, F., and Dominguez, E. (2020). Thermo-mechanical behavior of stainless steel fiber reinforced refractory. *Construction and Building Materials*, 240, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117881>
- Bo, W., Jie, G., Lu, Z., and Luzhe, W. (2020). Experimental study on fire resistance of full-scale earthquake damaged reinforced concrete columns. *Journal of Building Structures*, 41(11), 1-15. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0473>
- Calmeiro, D. S., and Correia, R. J. (2014). Residual mechanical properties of calcareous and granite aggregate concretes after fire. *Magazine of Concrete Research*, 66(16), 1400005. <https://doi.org/10.1680/jmacr.14.00005>
- Carrizo, L., Villagrán, Y., Pittori, A., and Zega, C. (2020). Incidencia de polvo calizo, puzolana natural y escoria en hormigones expuestos a altas temperaturas. *Ingenio Tecnológico*, 2, 1-12. Retrieved from <https://ingenio.frlp.utn.edu.ar/index.php/ingenio/articulo/view/22>
- Cruz, R., Zapata, L., Quintero, L., and Herrera, J. (2015). Physical and mechanical characterization of concrete exposed to elevated temperatures by using ultrasonic pulse velocity. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (75), 118-129. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n75a12>
- Da Silva, F., Silva, M., and Munaiar, J. (2020). Simulação termomecânica de prismas com blocos de concreto em situação de incêndio. *Revista Materia*, 25(1), e-12561. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0886>
- Feijoo, B. A., Tobón, J. I., and Restrepo-Baena, O. J. (2021). Substitution of aggregates by waste foundry sand: effects on physical properties of mortars. *Materiales De Construcción*, 71(343), e251. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.10320>
- Flores, V., Jiménez, V., and Pérez, A. (2018). Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57(6), 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.03.001>
- Galvez, J., Barzola, C., Gomez, R., and Torre, A. (2020). Estudio de las diatomitas de Ica como materia prima en la fabricación de áridos artificiales de arcilla para su uso como agregados ligeros en mezclas de hormigón diseñados en base a las exigencias de la NTP y ASTM. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 113-134. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-9i>
- Hachemi, S., Khattab, M., and Benzetta, H. (2023). Enhancing the performance of concrete after exposure to high temperature by coarse and fine waste fire brick: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 368, 130356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130356>
- Han, L., Zhou, K., Tan, Q., and Song, T. (2020). Performance of steel reinforced concrete columns after exposure to fire. *Engineering Structures*, 211, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110421>
- Humaish, A., Essa, A., and Edan, A. (2020). Fire resistance of selected construction. *AIP Conference Proceedings*, 2213(1), 1-10. <https://doi.org/10.1063/5.0000053>
- Khattab, M., and Hachemi, S. (2021). Performance of recycled aggregate concrete made with waste refractory brick. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 57, 99 - 113. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.57.9>
- Liu, Y., Jin, B., Huo, J., and Li, Z. (2018). Effect of microstructure evolution on mechanical behaviour of concrete after high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 70(15), 770-784. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00197>
- Ma, Q., Lin, Z., Guo, R., Yan, F., He, K., Zhao, Z., . . . Bai, Y. (2018). Performance of modified lightweight aggregate concrete after exposure to high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 70(24), 1243-1255. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00033>
- Memon, S., Shah, S., Khushnood, R., and Baloch, W. (2019). Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. *Construction and Building Materials*, 199, 435-455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.040>

- Molay, T., Lery, M., Fidele, T., Franck, H., and Bienvenu, N. (2019). Mechanical and physical performances of concretes made from crushed sands of different geological nature subjected to high temperatures. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22, 1116-1124. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.007>
- Moreno, L., Ospina, M., and Rodríguez, K. (2019). Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso. *Ingeniare*, 27(4), 635-642. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000400635>
- Sangi-Gonçalves, H., Penteado-Dias, D., and Castillo-Lara, R. (2022). Replacement of hydrated lime by lime mud-residue from the cellulose industry in multiple-use mortars production. *Materiales De Construcción*, 72(347), e292. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.17721>
- Sarhat, S. R., and Sherwood, E. G. (2013). Residual mechanical response of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11), 1721 - 1730. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000719](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000719)
- Sevim, O., Alakara, E. H., and Guzelkucuk, S. (2023). Fresh and Hardened Properties of Cementitious Composites Incorporating Firebrick Powder from Construction and Demolition Waste. *Buildings*, 13(1), 45. <https://doi.org/10.3390/buildings13010045>
- Shirani, K., Reisi, M., and Savadkoobi, M. S. (2021). Eco-friendly High-Strength Refractory Concrete Containing Calcium Alumina Cement by Reusing Granite Waste as Aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(48). <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00483-8>
- Shui-Jun, Y., Peng-Fei, Z., Xiao-Fang, Y., Hong, Z., and Xiao-Li, C. (2013). Refractory performance study on foamed concrete and concrete. *3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, CEABM 2013*. Jiaozuo: Applied Mechanics and Materials. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1034>
- Sobia, A., Azmi, I., Hamidah, M., and Rafeeqi, S. (2015). Elevated temperature resistance of ultra-high-performance fibre-reinforced cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*, 67(17), 923-937. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00134>
- Tufail, M., Shahzada, K., Gencturk, B., and Wei, J. (2017). Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 17-28. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0175-2>
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R., and Gül, R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 845-848. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.018>
- Varona, F., Baeza, F., and Iborra, S. (2018). Estudio de las propiedades mecánicas residuales de hormigones expuestos a altas temperaturas. *Hormigón y Acero*, 69(286), 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.04.004>
- Zeghad, M., Mitterpach, J., Safi, B., Amrane, and Saidi, M. (2017). Reuse of Refractory Brick Wastes (RBW) as a Supplementary Cementitious Material in a Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(1), 75-80. <https://doi.org/10.3311/ppci.8194>

## BIOGRAPHIES



**Jhan Brinner, Bereche Bello**, Civil Engineer by the Universidad Señor de Sipan, with experience in state works and municipalities of the Lambayeque region. Assistant supervision of infrastructure works such as schools, construction of roads and sidewalks, quality of concrete on site.



**Juan Martín, García Chumacero**, Civil Engineer from the Universidad Señor de Sipan, studying a Master's Degree in Geology at the Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru. Engineer dedicated to the area of research as a consultant and researcher in different branches of civil engineering such as concrete technology, roads and soil and slope stability, seismic analysis of structures among other areas, experience in writing research reports, scientific and review articles, contribution as a reviewer of a scientific article of the Journal Faculty of Engineering-University of Antioquia and Archives of Civil and Mechanical Engineering. Experience in supervision of educational infrastructure works and real estate projects at national level.



# La Evaluación Fisicomecánica del Concreto al Adicionar Cenizas del Tallo de Algarrobo para Pavimentos Rígidos - Ayacucho, Perú

Farfan, J. Alex<sup>1\*</sup> ; Quispe, Yuan<sup>1</sup> ; Vildoso, Alejandro<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería civil, Lima, Perú

**Resumen:** Los pavimentos rígidos están sujetos a transmisiones de cargas vehiculares que producen fisuras y grietas, debido a un mal diseño. Esto afecta al tránsito vehicular y al medio ambiente. El objetivo del estudio es conocer la influencia de la ceniza del tallo de algarrobo (CTA) para el concreto de diseño  $f_c$  210 Kg/cm<sup>2</sup>. En el cual, se incorporó una serie de dosificaciones del 0 % (concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 % de CTA. El estudio presenta una técnica cuantitativa y diseño cuasiexperimental. Se realizó un total de 60 muestras de concreto: divididas en 36 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para compresión, 12 viguetas de 15 x 15 x 50 cm para flexión y 12 discos de concreto de 5 x 10 cm para abrasión. Los resultados, a los 28 días, fueron los siguientes: al (0 %) de 243 Kg/cm<sup>2</sup>, 5 % de 247 Kg/cm<sup>2</sup>, 8 % de 224 Kg/cm<sup>2</sup> y 12 % de 216 Kg/cm<sup>2</sup>; para las resistencias a compresión. Concreto patrón (0 %) de 26 Kg/cm<sup>2</sup>, 5 % de 29 Kg/cm<sup>2</sup>, 8 % de 30 Kg/cm<sup>2</sup> y 12 % de 31 Kg/cm<sup>2</sup> para las resistencias a flexión. Concreto patrón (0 %) con un desgaste de 0.63 %, 5 % con un desgaste de 0.66 %, 8 % con un desgaste de 0.74 % y 12 % con un desgaste de 0.77 % para las resistencias a abrasión. Se concluye que el porcentaje óptimo e ideal es la adición parcial de CTA al 5 %; donde mejoran las características mecánicas del concreto en el diseño de pavimento rígido.

**Palabras clave:** Ceniza, pavimento rígido, concreto, dosificaciones

## The Physicomechanical Evaluation of Concrete by Adding Carob Stem Ash for Rigid Pavements - Ayacucho, Peru

**Abstract:** Rigid pavements are subject to vehicular load transmissions that produce fissures and cracks due to poor design. This affects vehicular traffic and the environment. The objective of the study is to know the influence of carob stem ash (CTA) for the design concrete  $f_c$  210 Kg/cm<sup>2</sup>. In which, a series of dosages of 0 % (standard concrete), 5 %, 8 % and 12 % of CTA was incorporated. The study presents a quantitative technique and quasi-experimental design. A total of 60 concrete samples was made, divided into 36 cylindrical specimens of 15 x 30 cm for compression, 12 joists of 15 x 15 x 50 cm for bending and 12 concrete discs of 5 x 10 cm for abrasion. The results, after 28 days, were as follows: (0 %) 243 Kg/cm<sup>2</sup>, 5 % 247 Kg/cm<sup>2</sup>, 8 % 224 Kg/cm<sup>2</sup> and 12 % 216 Kg/cm<sup>2</sup>; for compressive strengths. Standard concrete (0 %) of 26 Kg/cm<sup>2</sup>, 5 % of 29 Kg/cm<sup>2</sup>, 8 % of 30 Kg/cm<sup>2</sup> and 12 % of 31 Kg/cm<sup>2</sup>; for flexural strengths, and pattern concrete (0 %) with a wear of 0.63 %, 5 % with a wear of 0.66 %, 8 % with a wear of 0.74 % and 12 % with a wear of 0.77 % for abrasion resistance. It is concluded that the optimal and ideal percentage is the partial addition of CTA at 5 %, where it improves the mechanical characteristics of concrete in the design of rigid pavement.

**Keywords:** Ash, rigid pavement, concrete, dosages

### 1. INTRODUCCION

Es de suma importancia una buena construcción y diseño de un pavimento, pero algunos de los problemas que afectan son los cambios climáticos y el mal empleo de la dosificación de

materiales, de tal manera que dañan a la capa del concreto y perjudican en la duración de periodo.

Como manifiestan Izquierdo et al. (2018), el concreto hidráulico es muy utilizado en las construcciones y diseño de pavimentos rígidos en Brasil, en el cual, se han observado deficiencias, grietas y espaciamiento entre juntas, mayormente

\*alexis76859444@gmail.com

Recibido: 19/09/2023

Aceptado: 05/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.09

CC 4.0

en la parte media de la losa. Además, Paricaguán y Muñoz (2019) mencionan que los pavimentos rígidos no fueron realizados de una forma adecuada en Venezuela, ya que en algunas ciudades hay desconocimiento técnico por parte de los consultores al momento del diseño, a pesar de poseer un reglamento actualizado.

Según Montes et al. (2021), los pobladores costarricenses se han mostrado disgustados por la presencia de fallas y deterioros que presentan sus pavimentos rígidos a causa de no considerar las condiciones típicas del país. De la misma manera, Saavedra y Sarmiento (2021) afirman que la calidad del diseño de pavimento rígido se ha visto reflejado en sus deterioros superficiales, que provocan gastos innecesarios en reparaciones y dificultan el transporte de las actividades del comercio, turismo, entre otros. De acuerdo con Toribio y Ugaz (2021), el mal mantenimiento de pavimentos afecta negativamente el desarrollo de una ciudad, debido a que algunos diseños de pavimento no cumplen con las especificaciones adecuadas y que muchas veces se construyen sobre suelos con niveles freáticos elevados, residuos de sal, fallas geológicas, etc., lo que reduce el tiempo de vida para el pavimento. Además, Marrufo (2019) expone que, en la ciudad de Lima, para un buen mejoramiento, se debe formular e implementar un nuevo diseño de pavimento. Esto es debido a la falta de conocimiento en la construcción vial y la continuidad del uso de métodos antiguos en las construcciones, para así disminuir grietas en la superficie del pavimento, erosión y daños en las juntas.

El concreto es el material más utilizado en la construcción de pavimentos rígidos, donde la superficie de rodadura está sujeta a compresión o flexión, y muchas veces se producen grietas por transmisión de carga, lo que provoca incomodidad hacia las personas al transitar. Por lo tanto, las fallas del pavimento rígido, en la ciudad de Ayacucho - Perú, se deben a la falta de resistencia y las deformaciones acumuladas; ya que, en algunas construcciones se produjeron por errores técnicos o fallas del concreto, que comprometen al comportamiento del pavimento. Por consiguiente, en los últimos años, los pavimentos rígidos han empeorado con la congestión del tráfico y afecto negativo en el tránsito de los vehículos y medio ambiente.

Con respecto a la ceniza, Panadero (2022) manifiesta que la ceniza de madera es un elemento obtenido mediante la calcinación de la madera. Ésta contiene múltiples propiedades químicas y minerales que conforman para la elaboración de productos variables y hormigones en el ámbito de la construcción. Por ende, mediante esta investigación se gestionará este producto a través de la calcinación de tallos de algarrobos y experimentar los resultados favorables en la mejoría de la resistencia del concreto en un nuevo diseño óptimo de pavimento.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

#### 2.1.1 Ceniza del tallo de algarrobo (CTA)

Calle (2014) manifiesta que, el algarrobo es uno de los abundantes árboles de madera, que por lo general posee entre 4 a 16 metros de altura, con espinas largas y rectas y además, posee propiedades antibacterianas, antifúngicas, antiparasitarias y también nutricionales debido a sus propiedades químicas y bromatológicas. El algarrobo destaca como una especie melífera por su naturaleza, dado que sus flores poseen recursos para la producción de miel, jalea, polen y cera.

Panadero (2022) expresa que la ceniza de madera es un elemento o material de residuo, obtenido mediante la calcinación de la madera, que puede ser en una chimenea o también en una estufa de leña. Esta ceniza contiene múltiples propiedades y minerales, que conforman para la elaboración de variedades de productos.

Guzmán et al. (2020) mencionan que dentro de la normativa ASTM (American Standard for Testing and Materials); en específico la ASTM C 618, se clasifica a las cenizas por 3 tipos: Tipo F, si presenta bajo contenido en calcio, Tipo C a las que posee alto contenido de calcio y las de tipo N que son puzolanas naturales, como son las cenizas volcánicas.

La norma ASTM C 618 determina que la sumatoria de los siguientes componentes químicos ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) debe resultar, como mínimo, un 70 %; y como máximo debe presentar un 4 % de  $SO_3$ . La normativa ASTM E1534 - 93 describe un método estándar de prueba, con el objetivo de calcular el contenido de cenizas de madera expresada como porcentajes de residuos que se quedan después de la oxidación seca de combustibles de la madera. En otra de las normativas, González et al. (2019) mencionan que la norma ASTM D 3174 desarrolla el análisis de cenizas de carbón mediante una serie de procedimientos que determinan su composición dependiendo de sus constituyentes inorgánicos.

Para esta investigación, la ceniza se definió como un residuo producido por la combustión del tallo de algarrobo obtenido en un horno artesanal de una empresa panificadora de Ayacucho, como se muestra en la Figura 1. Dichos tallos fueron calcinados a una temperatura variable entre 400 y 500 °C durante 3 horas, en la cual, mediante el proceso de tamizado se obtuvo la ceniza pura, libre de grumos y carbones en exceso.



Figura 1. Horno artesanal para la incineración del tallo de algarrobo

La siguiente Tabla 1 presenta resultados de las propiedades químicas de la ceniza del tallo de algarrobo, obtenidas en el laboratorio MATESLAB SAC de la ciudad Lima; donde se

realizó el ensayo de Composición Química de Óxidos mediante el método de Fluorescencia de Rayos X.

ASTM C33, son productos originados por la desintegración de rocas volcánicas y riveras fluviales.

**Tabla 1.** Propiedades químicas de la ceniza del tallo de algarrobo (CTA)

Código	Ensayos	Unidad	Resultado
	Óxido de calcio (CaO)	%	8.721
	Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	%	59.21
	Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	%	0.152
	Óxido de magnesio (MgO)	%	1.56
	Óxido de manganeso (MnO)	%	0.366
	Trióxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	16.782
MTL - 230 - 37	Pentóxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	re
	Trióxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	4.573
	Óxido de bario (BaO)	%	0.05
	Óxido de zinc (ZnO)	%	0.036
	Óxido de cobre (CuO)	%	0.027
	Trióxido de cromo (CrO <sub>3</sub> )	%	0.85
	Otros	%	5.6

\* Los resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio por parte del solicitante.

### 2.1.2 Cemento

Según Nurtanto et al. (2020), el cemento es un material de construcción, como ingrediente fundamental, cuya principal propiedad es el aumento de dureza y resistencia al ser aglutinado con los agregados y el agua. Esta propiedad lo hace muy útil para la construcción de todo tipo de edificaciones ya que además de endurecer al agua, también mantiene un estado líquido antes de endurecerse, lo que le hace útil para formar elementos deseados.

Para los experimentos de esta investigación, se utilizó el Cemento Sol tipo I que tiene un peso específico de 3 150 Kg/cm<sup>3</sup>, recomendado por la norma técnica peruana NTP 334.001.

### 2.1.3 Agregados

De acuerdo con Chiman et al. (2014), los agregados poseen propiedades geológicas y mecánicas que provienen de las rocas ígneas con características mineralógicas.

En las Figuras 2 y 3, se muestran el agregado fino (AF) y el agregado grueso (AG); donde según la NTP 400.037 y el



**Figura 2.** Agregado fino



**Figura 3.** Agregado grueso

Los materiales mostrados en las Figuras 2 y 3, fueron proporcionados por el laboratorio de ensayo de materiales MATESLAB SAC, Lima (Perú), en la cual, se realizó la gradación según la NTP 400.037 y el ASTM C - 33.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Diseño de mezcla del concreto

Se ha determinado el diseño de mezcla mediante el método del ACI 211.1 en el concreto f<sub>c</sub> de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo siguiente, se planteó 4 dosificaciones con adición de cenizas del tallo de algarrobo, en relación con el peso del cemento, para el 0 % (diseño del concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 %. Dicho diseño se realizó en los laboratorios de concreto MATESTLAB SAC, de la ciudad de Lima - Perú.

### 2.2.2. Diseño del pavimento rígido

Para determinar el espesor del pavimento rígido, se empleó el método del AASHTO (1993); el cual considera una serie de variables y parámetros que influyen en la ecuación final para su diseño adecuado, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\text{Log}_{10}(W18) = Z_r S_o + 7.35 \text{Log}_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\text{Log}_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(D+1)^{8.46}}}$$

$$+(4.22 - 0.3 * Pt) \text{Log}_{10} \left( \frac{S'c Cd * (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J(D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/R)^{0.25}})} \right) \tag{1}$$

Donde:

- W18 = El número de las cargas de 18 kips
- ZR = Desviación de la norma
- So = EL Error estándar.
- D = Espesor (en pulgadas) de la losa del pavimento.
- ΔPSI = Pérdida de la serviciabilidad.
- Pt = Capacidad de servicio final.
- S'c = El módulo de rotura del concreto, (psi).
- J = El coeficiente de la transferencia de carga.
- Cd = El coeficiente del drenaje.
- Ec = El módulo de la elasticidad del concreto, (psi).
- K = El módulo de la reacción de subrasante, (psi/in).

En la Tabla 2, se presentan los parámetros de diseño; en la cual se extrajeron de un expediente técnico que se ejecutó en la ciudad de Ayacucho, cuyo nombre del proyecto fue “Creación de pistas y veredas en las calles de la Asociación Miraflores sector I, los mecánicos de Torohuichcana y San Melchor de Torohuichcana del Distrito de San Juan Bautista - Provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho – I etapa”.

**Tabla 2.** Parámetros para el diseño de pavimento rígido

Parámetro de diseño	Resultado
Tráfico (ESAL)	255 310.213
Resistencia del concreto (Kg/cm <sup>2</sup> )	210
Índice de serviciabilidad inicial (Po)	4.5
Índice de serviciabilidad final (Pt)	2
El módulo de ruptura (S'c)	437.17 psi
El módulo de elasticidad (Ec)	3 115 195.44 psi
La resistencia de la subrasante (K)	49.96 M <sub>pa</sub> /m
Coeficiente de transferencia de carga (J)	3.8
El coeficiente de drenaje (Cd)	1
El nivel de confiabilidad (R)	90
La desviación estándar normal (Zr)	-1.282
El error estándar combinado	0.35

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Propiedades físicas del concreto

##### 3.1.1 Asentamiento (Slump)

Se describe de la siguiente manera. Primero, se determinó la homogeneidad y uniformidad del concreto para ser colocados en un molde de cono de Abrams, distribuido en 3 capas a 25 golpes suaves con una varilla metálica por cada capa. Luego, fue retirado cuidadosamente el molde y se determinó la consistencia del concreto. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento para las diferentes dosificaciones propuestas.

Como resultado, el concreto patrón mostró un mayor valor numérico de consistencia blanda. Mientras que los concretos experimentales presentaron una consistencia plástica, según el

comité ACI 211. De tal manera, que al ser verificado por la norma ASTM C143, las dosificaciones propuestas se encuentran dentro de los parámetros permitidos (3” – 4”) debido a la adición parcial de CTA. Pero este resultado no sería el mismo si se adicionaran más porcentajes de CTA, ya que esta afectaría en la relación a/c debido a que la ceniza posee alta superficie relativa según su naturaleza, la cual afecta en la trabajabilidad y resistencia del concreto. Por otra parte, los resultados también serían distintos si se hubiera realizado una sustitución parcial de CTA.

##### 3.1.2. Contenido de aire

Según la norma ASTM C 231-78, para este ensayo se utilizó un medidor de tipo B (Olla Washington), el que posee una tapa con manómetro de lectura para hermetizar la muestra. Por consecuente, se procedió a cerrar dicha tapa y se comenzó, con la ayuda de una pipeta, a inyectar agua por una válvula hasta salir por la otra. Luego, se procedió a cerrar las válvulas y se introdujo aire bombeado hasta que la aguja del manómetro se posiciona con la presión inicial. Finalmente, después de que la aguja se asentara, se calculó el porcentaje de aire en el instrumento. Se realizó el mismo procedimiento para las diferentes dosificaciones propuestas.

Según los resultados, las dosificaciones experimentales propuestas presentaron bajos porcentajes de contenido de aire con respecto al diseño de mezcla según el estilo del ACI 221.1; donde menciona que para un TMN de ¾” del agregado grueso presenta un contenido de aire de 2 %. Se concluye de esta manera, que los porcentajes de aire se encuentran óptimos para los ensayos correspondientes; ya que, si presentaran mayores porcentajes de aire, afectaría la resistencia del concreto.

#### 3.2 Propiedades mecánicas del concreto

##### 3.2.1 Ensayo de resistencia a compresión

Para este experimento, con base en la NTP 339.034, se elaboró muestras de 36 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para determinar las resistencias a la compresión en los 7, 14 y 28 días del curado en los distintos porcentajes de adición de CTA al 0 % (concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 %; para un diseño f'c de 210 Kg/cm<sup>2</sup>, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resistencia a la compresión

Edades (Días)	Resistencias a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )			
	Concreto Patrón	Dosificación 5 %	Dosificación 8 %	Dosificación 12 %
7	170	187	170	164
14	195	216	198	180
28	243	247	224	216

Según los resultados de laboratorio, se observó que la dosificación óptima, que supera al diseño de concreto patrón (por la mínima) y a las demás dosificaciones a los 28 días, es el porcentaje de adición de CTA al 5 % con una resistencia máxima de 247 Kg/cm<sup>2</sup>.



3.2.2 Ensayo de resistencia a flexión

Para dicho ensayo, con base en la NTP 339.078, se desarrolló 24 probetas prismáticas (viguetas) como muestras de concreto para realizar la resistencia a flexión, cuyas medidas fueron de 15 x 15 x 50 cm. Los ensayos se realizaron a los 28 días de curado para los distintos porcentajes de adición de CTA al 0 % (concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 %, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia a la flexión

Resistencia a la flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )				
Edades (Días)	Concreto Patrón	Dosificación 5 %	Dosificación 8 %	Dosificación 12 %
28	26	29	30	31

Según los resultados, se mostró las resistencias promedias a flexión, de 26 Kg/cm<sup>2</sup> para la dosificación del concreto patrón, 29 Kg/cm<sup>2</sup> para el 5 % de CTA, 30 Kg/cm<sup>2</sup> para el 8 % de CTA y 31 Kg/cm<sup>2</sup> para el 12 % de CTA. De esta manera, se concluyó que la dosificación óptima, para los resultados favorables en el mejoramiento de dicho ensayo, es el 12 % CTA.

3.2.3 Ensayo de resistencia a abrasión

Para este caso, con base en la norma internacional ASTM C-779, se realizaron las muestras de 12 discos de concreto de 5 x 10 cm con el objetivo de determinar las resistencias a abrasión para los 28 días del curado en los diferentes porcentajes de adición de CTA al 0% (concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 %; como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Resistencia a la abrasión

Resistencia a la abrasión (%)				
Edades (Días)	C° Patrón	Dosificación 5 %	Dosificación 8 %	Dosificación 12 %
A los 28	0.63	0.66	0.74	0.77

Según los resultados, se mostraron las resistencias promedias a abrasión para los 28 días de curado, de 0.63 % para la dosificación del concreto patrón, 0.66% para el 5 % de CTA, 0.74 % para el 8 % de CTA y 0.77 % para el 12 % de CTA. De este modo, se concluyó que el porcentaje óptimo para este ensayo fue el diseño patrón del 0 %, ya que esta resultó tener el menor porcentaje de desgaste y una mayor resistencia a la abrasión.

3.3 Diseño del pavimento rígido

Una vez obtenidos todos los parámetros de diseño, mostrados en la Tabla 3, se realizó el cálculo del espesor de la losa de concreto por el método del AASHTO 93 para pavimentos rígidos.

Para este proceso, se realizaron dos diseños; una con el diseño convencional de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y otra con el diseño experimental

que mejora su resistencia a compresión del concreto correspondiente al porcentaje óptimo del 5 % de CTA.

3.3.1 Para el concreto convencional de f'c=210 Kg/cm<sup>2</sup>

En la Figura 4, se muestra dicho diseño mediante una hoja de cálculo Excel, donde se determinó el espesor de 20 cm para la losa del pavimento rígido.

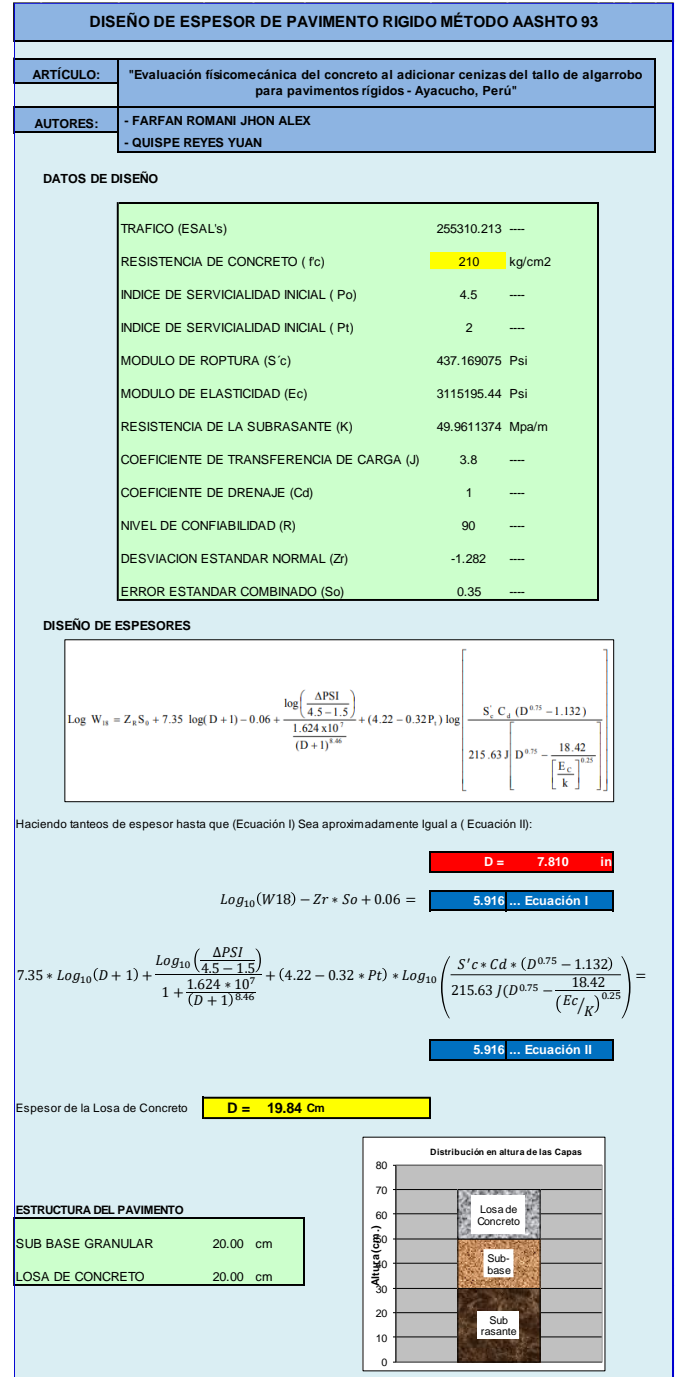


Figura 4. Diseño del pavimento rígido convencional

3.3.2 Para el concreto experimental (5 % de CTA como dosificación óptima), f'c=247 Kg/cm<sup>2</sup>

Con el objetivo de disminuir el espesor del pavimento y optimizar los costos, se realizó un diseño adicional con el

porcentaje máximo de CTA al 5 %; donde se pudo reducir el espesor del pavimento de 20 a 19 cm, como se muestra en la Figura 5.

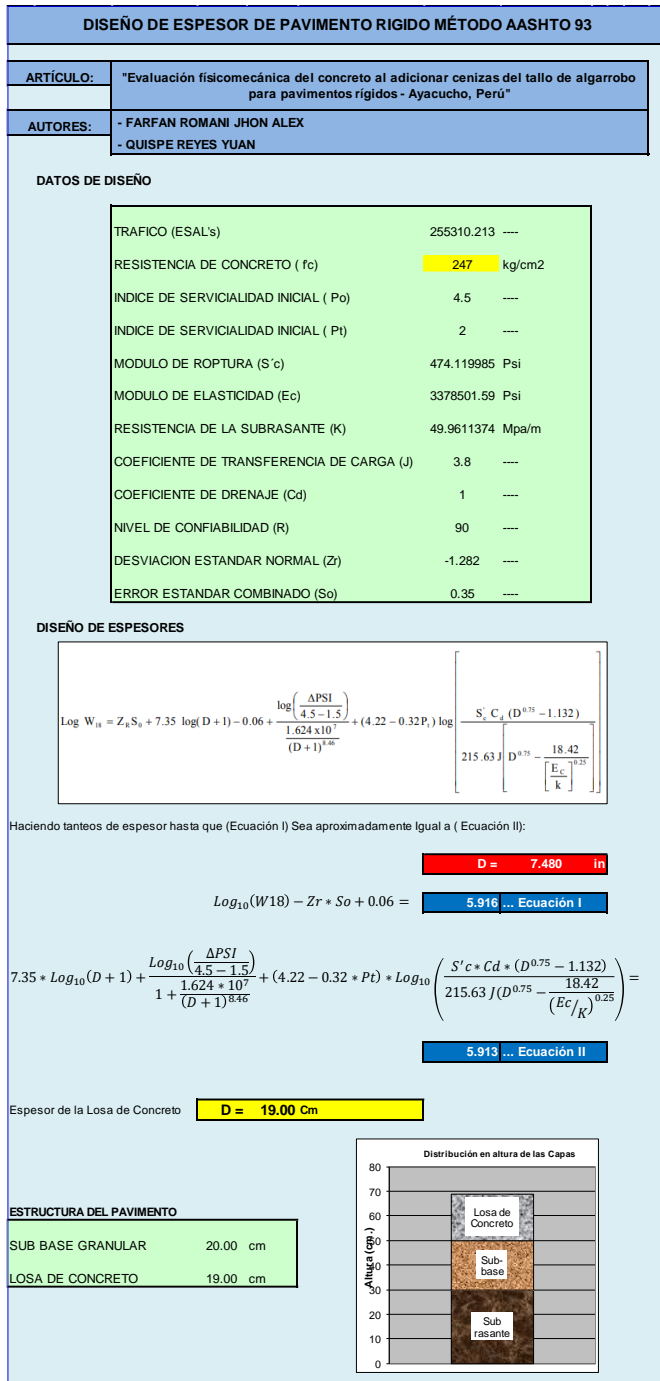


Figura 5. Diseño del pavimento rígido experimental

#### 4. CONCLUSIONES

Con respecto a la obtención y recolección de CTA, fue un proceso sencillo para esta investigación, ya que se recolectó de una empresa panificadora, más influyente de la región, que elabora sus productos en un horno artesanal a base de las leñas de algarrobo que abundan en la zona. La calcinación llegó a una temperatura alta de 440 °C en un intervalo de tiempo de 4 a 5 horas, para luego ser tamizados y trasladados al laboratorio.

En relación con las propiedades químicas de CTA, se muestra un mayor porcentaje de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silicio) en relación a la composición del cemento utilizado. Según la normativa ASTM C 618, el tipo de ceniza a utilizar se encuentra en la clase N porque se realizó el proceso de calcinación para obtenerlas. Además, la sumatoria de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 80.56 % > 70 % (cumple), y SiO<sub>3</sub> = 0.152 % < 4 % (cumple).

Para las características físicas de los agregados, se determinó un tamaño máximo nominal de 3/4" para el AG, según la Normativa ASTM C33. Asimismo, presentó un módulo de fineza de 3.18 para el AF y 7,41 para el AG, contenido de humedad de 3.12 % y 5.27 % para AF y AG, respectivamente. El porcentaje de absorción es de 1.9 % y 1.3 % para AF y AG respectivamente. El peso unitario suelto es de 1 635 Kg/m<sup>3</sup> y compactado de 1 767 Kg/m<sup>3</sup>, para AF. El peso unitario suelto es de 1 586 Kg/m<sup>3</sup> y compactado de 1 641 Kg/m<sup>3</sup>, para AG.

Para las características físicas del concreto, se determinó que los asentamientos, para cada una de las dosificaciones propuestas, se encuentran dentro de los parámetros permitidos (3" - 4") según la normativa ASTM C143. Las dosificaciones propuestas de 0 % (concreto patrón), 5 %, 8 % y 12 % presentaron bajos porcentajes de contenido de aire con respecto al 2 % del contenido de aire según el diseño de mezcla por el método ACI, debido a la adición parcial de CTA. Pero este resultado no sería el mismo si se adicionaran más porcentajes de CTA, ya que esta afectaría en la relación a/c debido a que la ceniza posee alta superficie relativa según su naturaleza, la cual afecta en la trabajabilidad y resistencia del concreto. Por otra parte, los resultados también serían distintos si se hubiera realizado sustitución parcial de CTA.

En relación a las características mecánicas del concreto, la adición parcial de ceniza de tallo algarrobo obtuvo buenos resultados y favorables en la mejora del concreto. Se mejoró la resistencia a compresión en un 117.6 % al adicionar el porcentaje óptimo de 5 % de CTA (la resistencia máxima de 247 Kg/cm<sup>2</sup>), con respecto al concreto de diseño. Se mejoró en la resistencia a flexión en un 119.3 % al adicionar el porcentaje óptimo de 12 % de CTA (resistencia máxima de 31 Kg/cm<sup>2</sup>), con respecto al concreto patrón. La resistencia a la abrasión no fue mejorada al adicionar porcentajes de CTA; ya que el diseño patrón resultó tener un valor menor y óptimo en la resistencia (desgaste de 0.63 %) que los otros diseños experimentales.

La dosificación del 5 % resultó ser el óptimo para un incremento de la resistencia a compresión y así poder realizar una construcción eficaz de pavimentos rígidos. El espesor de la losa del pavimento disminuye, con un cambio no significativo, de 20 a 19 cm para un diseño óptimo de 5 % de CTA al mejorar de un diseño convencional de 210 Kg/cm<sup>2</sup> a un diseño experimental 247 Kg/cm<sup>2</sup> de resultado. De tal manera que, se optimizó en la reducción de costos en el diseño y/o producción de pavimentos rígidos.

#### REFERENCIAS

AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures.

- Calle, R. (2014). *El Algarrobo*. <https://www.ciencias.pe/el-algarrobo>
- Chiman, A., Chiman, L., Sanabria, L. E., & Correa, J. W. (2014). Caracterización comparativa de agregados obtenidos de rocas ígneas usados en construcción vial. *Revista Infraestructura Vial*, 16(28), 5-12. <https://doi.org/10.15517/iv.v16i28.14222>
- González, E. A., Martínez, D., García, A. M., Ramos, G. M., Camporeddo, J. E., & Cano, B. B. (2019). Evaluación de una técnica alternativa para el análisis de ceniza en muestras de carbón. *GEOMIMET*. <https://www.revistageomimet.mx/2020/02/evaluacion-de-una-tecnica-alternativa-para-el-analisis-de-ceniza-en-muestras-de-carbon/>
- Guzmán, J., Reyes, E., & Molina, O. I. (2020). Evaluación del rendimiento del mortero que emplea ceniza volante como sustituto parcial del cemento pórtland. *Revista Ciencia y Construcción*, 1(2), 43-51. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/22>
- Izquierdo, I., Izquierdo, O., & Ramalho, M. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 229-240. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229>
- Marrufo, A. (2019). *Evaluación superficial del pavimento rígido de la AV. Las Gaviotas, entre las cuadras de 1 al 8 de Chorrillos – Lima, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio del Campus de la UCV. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/59690/B\\_Marrufo\\_FA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/59690/B_Marrufo_FA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Montes, M. P., Sequeira, W., Ávila, T., & Aguiar, J. P. (2021). Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial*, 23(42), 53-60. <https://doi.org/10.15517/iv.v23i42.46947>
- Nurtanto, D., Junaidi, I., Wahyuningtyas, W., & Yunarni, W. (2020). Comparación de la adición de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza de teja en cemento geopolímero a base de cenizas volantes con cemento portland. *Revista Ingeniería de la Construcción*, 35(3), 287-294. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000300287>
- Panadero. (2022). *Usos para la ceniza de madera*. <https://panadero.com/es/usos-ceniza-madera/#:~:text=La%20ceniza%20de%20madera%20es,hogar%20como%20en%20la%20industria.>
- Paricaguán, B. M., & Muñoz, J. L. (2019). Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *Revista Ingeniería UC*, 26(2), 202-212. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70760276009>
- Saavedra, F. D., & Sarmiento, A. B. (2021). *Mantenimiento de pavimento rígido y flexible para evitar un desgaste prematuro en vías urbanas*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio del Campus de la URP.

<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4748>

- Toribio, H. D., & Ugaz, J. A. (2021). *Evaluación del concreto reforzado con fibras de acero recicladas para mejorar las propiedades de un pavimento rígido*. [Tesis de pregrado, Universidad San Martín de Porres]. Repositorio del Campus de la USMP. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/8860>

## BIOGRAFÍAS



**Jhon Alex, Farfan Romani**, nació en Ayacucho – Perú en 1995. Ingeniero civil de la Universidad Cesar Vallejo, posee más de 5 años de experiencia laboral en el ámbito de la construcción y ejecución de proyectos de edificaciones y obras viales como carreteras, pistas y veredas, saneamientos básicos, etc. Desempeñando sus labores como topógrafo, asistente técnico de obra y asistente técnico de supervisión de obras.



**Yuan, Quispe Reyes**, nació en Ayacucho – Perú en 1993. Ingeniero civil de la Universidad Cesar Vallejo, con código, laborando en empresas públicas y privadas en el ámbito de la construcción y ejecución de proyectos de edificaciones y obras viales como carreteras, pistas y veredas, saneamientos básicos, etc. Actualmente, forma parte de la empresa ALINTI dedicada a la biotecnológica que genera electricidad a través de las plantas y que se encuentra en plena investigación.



**Alejandro, Vildoso Flores**, nació en Lima – Perú en 1975. Ingeniero Civil titulado y colegiado, egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería, cuenta con experiencia profesional en la gerencia y gestión de obras de construcción, metrados, análisis de costos estructurales y procesos constructivos, siendo socio y gerente de proyectos de las empresas COPROVA SRL y VG&V Asociados SAC. Con preparación para desarrollar actividades de docencia universitaria en las cátedras de: Construcción 1 y 2, Mecánica de Suelos 1 y 2, Mecánica de fluidos 1 y 2, Tecnología del Concreto y de Materiales en distintas universidades.



# Una Revisión de Ladrillos de Suelo y Cemento con Refuerzos Diversos

Jiménez-Montoya, Adán<sup>1</sup> ; Pascual-Francisco, Juan Benito<sup>2,\*</sup> ; Sánchez-Cruz, Gabriela<sup>1</sup> ; Ríos-Ledezma, María Guadalupe<sup>1</sup> ; Novelo-Ramos, Jael Kaleb<sup>1</sup> ; Matías-Molina, Ana Laura<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso, División de Ingeniería Civil, San Felipe del Progreso, México

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Mecatrónica, Zempoala, México

**Resumen:** El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis comparativo de investigaciones relacionadas a la determinación de propiedades físico-mecánicas de unidades de construcción (adobes y ladrillos) hechos de suelo, suelo-cemento y concreto con refuerzos diversos para proveer un panorama sobre procedimientos que conduzcan a la mejora del desempeño de estas unidades de construcción. Se analiza la variación porcentual de resistencia a la compresión, tensión, flexión, aislamiento térmico, densidad y absorción de agua acorde al tipo de refuerzo y mortero base. La incorporación de cemento como refuerzo parece tener el mayor efecto en la mejora de desempeño por resistencia a la compresión, los plásticos al aislamiento térmico, densidad y absorción de agua y los vegetales en resistencia a la tensión.

**Palabras clave:** Adobes, ladrillos, concreto, refuerzos, plásticos, fibras

## Soil and cement bricks with diverse reinforcements: A Review

**Abstract:** The objective of this work is to carry out a comparative analysis of researches related to the determination of physical-mechanical properties of construction units (adobe and bricks) made of soil, soil-cement, and concrete with various reinforcements, to provide an overview of procedures that could lead to the improvement of the performance of these construction units. The percentage variation of compressive, tensile, flexural strength, thermal insulation, density, and water absorption according to the type of reinforcement and base mortar is analyzed. The incorporation of cement as reinforcement seems to have the greatest effect on improving the compressive strength, plastics on thermal insulation, density, and water absorption, and vegetables on tensile strength.

**Keywords:** Adobe, concrete, bricks, reinforcement, plastics, fibers

### 1. INTRODUCCIÓN

Los adobes son elementos de construcción hechos a base de suelo, reforzados con fibras vegetales, generalmente paja. Los primeros usos documentados de los que se tiene constancia vienen de las primeras civilizaciones como la Sumeria, o la Anasazi e Incaica en América (Cordell, 1996; Lucas & Harris, 2011). Estas unidades de construcción de dimensiones variables (según el lugar de fabricación y norma de construcción aplicable), regularmente consisten de suelo local, cuyos componentes son alguna proporción de: limo, arcilla, arena y grava y cierto porcentaje de materia orgánica y alguna adición de algún tipo de fibra natural como refuerzo (Barriola & Ginoccio, 1983).

Debido a cuestiones ecológicas, de economía y desempeño, recientemente, se han incrementado la cantidad de investigaciones realizadas en torno al mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de adobes y ladrillos de concreto

reforzados con otros tipos de materiales (nuevos y/o de reúso), entre los cuales se encuentran vegetales, textiles, plásticos, resinas, cemento, desechos de construcción, entre otros, en presentaciones como: pellet, hojuelas, tiras, entre otros, especialmente fibras.

En la presente revisión, se contemplan investigaciones recientes alrededor del mundo con especial enfoque en publicaciones en Latinoamérica y de trabajos sin mucha difusión en revistas especializadas, pero con mayor importancia en la región, tales como tesis. En este trabajo, se obtiene como resultado una tendencia sobre la mejora de desempeño de las propiedades físico-mecánicas de las unidades de construcción según el tipo de refuerzo, lo que se puede aprovechar para generar propuestas de construcción basadas en los estudios cuyo refuerzo muestra mejor desempeño, así como entender e identificar las áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevas propuestas de

\*jbpascualf@hotmail.com

Recibido: 22/11/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/rp.vol53n2.10

CC 4.0

materiales para reforzamiento de adobes y ladrillos con fines de construcción.

## 2. ARTÍCULOS DE REVISIÓN PREVIOS

Se consultaron 17 artículos de revisión relacionados con adobes y unidades de construcción reforzados, los enfoques que abordan son: estudios de resistencia mecánica, densidad, propiedades térmicas y absorción de agua para adobe tradicional comprimido (sin refuerzos en fibra o aditivos) (Brito-del Pino et al., 2021; Deboucha & Hashim, 2011), adobe reforzado con diversos tipos de aglutinantes y de fibras sintéticas y naturales nuevas y de desecho, analizando alguna o varias de las propiedades de: conductividad, resistencia a la compresión, conductividad térmica, densidad y absorción de agua, con sus respectivas normatividades (Balan et al., 2021; Hejazi et al., 2012; Jannat et al., 2020; Paul et al., 2022; Ramakrishnan et al., 2021; Salazar-Saucedo & Tejada-Escobedo, 2021; Salih et al., 2020b; Yazici & Keskin, 2021) desechos sólidos y su aplicación en elaboración de unidades de construcción (desechos solos o con algún tipo de suelo). Además, se analizaron propiedades mecánicas de conductividad y absorción de agua (Goli et al., 2020; Kumar et al., 2021; Sharma et al., 2021) y aplicabilidad (Safiuddin et al., 2010), análisis de varios tipos de ladrillos y adobes con enfoque en propiedades térmicas, así como por propiedades mecánicas (Cuitiño-Rosales et al., 2020) y blocks de concreto reforzado con diversos tipos de fibras sintéticas y naturales. Asimismo, se analizó alguna o varias de las propiedades: conductividad resistencia a la compresión, conductividad térmica, densidad y absorción de agua con sus respectivas normatividades (Ming et al., 2021; Thakare et al., 2021).

## 3. TIPOS DE REFUERZO

El estudio de propiedades físico-mecánicas se realizó clasificando los estudios acordes al tipo de refuerzo y de mortero base. Los morteros utilizados son suelo *AS* (adobes y ladrillos de suelo), suelo-cemento *ASC* (adobes y ladrillos de suelo-cemento) y concreto *C* (ladrillos de concreto). Los tipos de refuerzos, de acuerdo con los estudios disponibles, se clasificaron como: plásticos *P*, cemento *C* y otros *O* (en su mayoría fibras vegetales).

Por lo tanto, en las categorías clasificadas y analizadas se encuentra el adobe-suelo tradicional sin refuerzo adicional (*AS*) (Gama-Castro et al., 2012; Gutiérrez-Villalobos et al., 2021; Illampas et al., 2014; Yetgin et al., 2008), adobe/suelo más refuerzo plástico (*AS + P*); siendo los plásticos de refuerzo (*P*) utilizados en las diferentes pruebas Tereftalato de Polietileno (*PET*) (Ahmad et al., 2022; Araya-Letelier et al., 2019b; Ascencios-Mostacero, 2020; Aznarán-Monzón, 2018; Barturen-Payano, 2020; Bertelsen et al., 2021; Candenastacac et al., 2018; Cerna-Livia & Velásquez, 2021; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Lozano-Rios & Valle-Fernández, 2020; Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Peña-Estrella & Niño-Santos, 2019; Quispe-Crisis, 2017; Robalino-Sánchez, 2019; Subramania-Prasad et al., 2011; Subramania-Prasad, 2013; Tavares & Magalhães, 2019), generalmente utilizados en fibras o molido, polipropileno (*PP*) (Araya-Letelier et al., 2019a; Ascencios-Mostacero, 2020; Burbano-García et al., 2022; Menon & Ravikumar,

2019; Muntohar et al., 2013; Nasrollahzadeh & Zare, 2020; Onochie & Balkis, 2021; Peña-Estrella & Niño-Santos, 2019; Salaou et al., 2021; Sujatha & Selsia-Devi, 2018); Vignesh et al., 2021),

poliestireno (*PE*) (Abad-Flores, 2020; Inga-Castro, 2019; Vignesh et al., 2021), poliuretano (*PU*) (Rabello & da Conceição-Ribeiro, 2021), resina (Serrano et al., 2016), policloruro de vinilo (*PVC*) (Ascencios-Mostacero, 2020) o plástico sin especificación en general (*PLAS*) en presentaciones tales como geomalla (Mir & Shah, 2019; Solís et al., 2015) o “bar chip” (El-Emam & Al-Tamimi, 2022).

Se categoriza también al cemento como refuerzo para adobe-suelo (*AS + C*) (Goutsaya et al., 2021; Ruiz et al., 2018). También, se utiliza esta combinación, pero como mortero base (adobe/suelo/cemento) y se agrega plástico como refuerzo (*ASC + P*), siendo el refuerzo en estos casos *PET* (Araya-Letelier et al., 2019b; Consoli et al., 2002; Gordillo-Monteza, 2020; Guio-Pérez, 2019; Oliveira-Metzker et al., 2022; Paschoalin-Filho et al., 2016; Subramania-Prasad et al., 2011, 2014; Vázquez-Greciano, 2018), *PP* (Donkor et al., 2021; Donkor & Obonyo, 2015; Radwan et al., 2021), *PE* (Binici et al., 2005, 2007), plástico virgen (Jayaram et al., 2021) y plástico no especificado (Binici et al., 2005, 2007) y Bar Chip (El-Emam & Al-Tamimi, 2022).

Se agrega la categoría de ladrillos de concreto reforzados con algún tipo de plástico o polímero, (*C + P*) para contrastar la variación de las propiedades físico-mecánicas respecto al adobe con refuerzos similares. En este caso, los refuerzos son *PET* (Bailón-Espinoza & Huatuco-Cordova, 2021; Campos-Barboza et al., 2019; Di Marco-Morales & León-Téllez, 2017; Dueñas et al., 2021; Farias-Solano, 2019; Márquez-Domínguez et al., 2018; Meza-de Luna et al., 2021; Pérez-Collantes, 2021; Pérez-Pérez & Zamora-Fernández, 2020; Piñeros-Moreno & Herrera-Muriel, 2018; Sandoval-Saucedo & Guzmán-Hasegawa, 2019), polipropileno (Ccansaya-Saldaña & Piña-Pereyra, 2021; Illampas et al., 2014; Islam et al., 2022) y cubierta de cables conduit (Khalid et al., 2020).

Finalmente, la última categoría es adobe-suelo con otros tipos de refuerzo (*AS + O*) siendo estos cascarilla de arroz (Ascencios-Mostacero, 2020), cabuya (Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021), bagazo de caña de azúcar, fibra de paja de arroz (Chib & Sharma, 2021), polímero de fibra de vidrio (Gandía et al., 2019), desecho de ladrillo triturado y cemento (Kasinikota & Tripura, 2021), pluma de pollo y bagazo de caña de azúcar (Salih et al., 2020a), cáñamo y paja (Calatan et al., 2016), fibra de vidrio, yute y fibra de banana (Sujatha & Selsia-Devi, 2018), cemento y fibras de basalto (Wang et al., 2020), neumáticos molidos (Oliveira-Metzker et al., 2022), cemento y fibra de palma (El-Emam & Al-Tamimi, 2022), paja y cemento (Binshad et al., 2018), alignato y fibras de lana (Galán-Marín et al., 2013), caña de maíz, fescua, paja, huesos de aceituna molidos y goma molida (Serrano et al., 2016) y pluma de pollo (Burbano-García et al., 2022).

De los estudios enfocados, únicamente al adobe reforzado con fibras plásticas es, en su mayoría, realizado en Perú, bajo la modalidad de tesis. Destaca el papel de la Universidad César Vallejo de Perú, en donde se han realizado 17 de los estudios que se reportan en el presente artículo.

## 4. NORMATIVIDAD APLICADA

Las normatividades utilizadas son diversas, acorde al país de realización y a la prueba o medición realizada según el tipo de mortero. En la Tabla 1, se resume la aplicación de normas acorde al tipo de estudio según lo reportado por los autores de los diversos estudios abordados. En el caso de Sudamérica, específicamente Perú, para el estudio de adobe en pruebas de granulometría, dimensionamiento y físico-mecánicas en adobe y especímenes de suelo o suelo-cemento se utiliza la NTP (norma técnica peruana) E.080 (Ministerio de Vivienda, 2017) empleada prácticamente en la totalidad de los estudios abordados (Abad-Flores, 2020; Araya-Letelier et al., 2019a; Ascencios-Mostacero, 2020; Aznarán-Monzón, 2018; Barturen-Payano, 2020; Cerna-Livia & Velásquez, 2021; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Inga-Castro, 2019; Lozano-Rios & Valle-Fernández, 2020; Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Quispe-Crisis, 2017; Robalino-Sánchez, 2019). Para el dimensionamiento, granulometría y pruebas fisicomecánicas en general de especímenes de concreto y algunos en espécimenes de mortero suelo-cemento, la norma más utilizada es la Norma Técnica Peruana NTP E.070 (Ministerio de Vivienda, 2014), usada por Campos-Barboza et al. (2019), Ccansaya-Saldaña & Piña-Pereyra (2021), Farias-Solano (2019), Pérez-Collantes (2021) y por Pérez-Pérez & Zamora-Fernández (2020). Así mismo, en conjunción con la norma E.080, para especímenes de adobe, se utiliza la NTP 339.613 (Instituto Nacional de Calidad, 2003) y en conjunción con la norma E.070 en conjunción se utiliza la NTP 339.034 (Instituto Nacional de Defensa Civil., 2005) para especímenes de concreto, tal como se muestra en los trabajos de Illampas et al. (2014), Pérez-Pérez & Zamora-Fernández (2020) y Sandoval-Saucedo & Guzmán-Hasegawa (2019).

Para el caso de Colombia, se utiliza la Norma Técnica Colombiana NTC, en sus versiones 3495 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación., 1998) utilizada por Peña-Estrella & Niño-Santos (2019). Para granulometrías y pruebas fisicomecánicas en adobe-suelo; así como la norma 4205 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2000) utilizada por Piñeros-Moreno & Herrera-Muriel (2018) para mezclas dimensionamiento y pruebas de fisicomecánicas en concretos.

En el caso de Brasil, se utiliza la norma Técnica Brasileña ABNT 8492 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984) utilizada para pruebas de infiltración en los estudios de Gandia et al. (2019), Oliveira-Metzker et al. (2022) y Paschoalin-Filho et al. (2016).

En Asia, predomina el uso de las normas indias IS, tales como la IS 2710 (Bureau of Indian Standards, 1980) utilizada por Menon & Ravikumar (2019) y Mir & Shah (2019) para suelos no consolidados, la norma IS 2720-13 (Bureau of Indian Standards, 1986) para pruebas de cortante directa en suelos consolidados, utilizada por Binshad et al. (2018), Kasinikota & Tripura (2021) y Mir & Shah (2019), la norma IS 3495 (Bureau of Indian Standards, 1992) y la IS 1725 (Bureau of Indian Standards, 1982) utilizada por Subramania-Prasad (2013) y Vignesh et al. (2021) para pruebas de absorción.

En la mayoría de los países europeos, se utiliza la norma inglesa EN, tal como la EN 1052-2:2016 (European Committee for Standardization, 2016), utilizada por ejemplo por Salih et al. (2020a) para suelo comprimido, y la norma inglesa EN 772-1:2011 (European Committee for

**Tabla 1.** Normatividad aplicada según el tipo de prueba

Prueba	Norma	País en que se ejecutó el estudio
Elaboración de morteros, dimensionamiento	NTP E.080 NTP E.070, NTP 339.613	Perú, Ecuador, Colombia, Brasil
	NTC 3495, NTC 4205	Colombia
	EN 772-1:2011	Reino Unido, India
	IS 2710, IS 2720 – 13, NTP 339.034	India
	ASTM D6913-17, ASTM D7928, ASTM C127	Estados Unidos, Perú, Chile, Irán, Reino Unido, México.
	NTP E.080, NTP E.070	Perú, Ecuador.
Compresión Flexión Tensión Cortante	NBR 8492	Brasil
	IS 2710, IS 2720-13	India, Egipto
	EN 1052-2:2016, EN 1015-11.	Reino Unido, Kenia, India
	NTC 3495, NTC 4205	Colombia
	ASTM D5102-09 ASMT C109/C109M-16 <sup>a</sup> , ASTM C349-15,	Estados Unidos, India, Chile, Perú, Emiratos Árabes Unidos, Canadá, Turquía
	NTP E.070, NTP E.080	Perú
Densidad	EN 771-1:2003	Reino Unido, India, Kenia
	ASTM C127-15	India, Dinamarca, Malasia, Perú
Aislamiento térmico	ASTM D645,	Brasil, Turquía
	NTP E.080, NTP E.070, NTP 339	Perú, México, Colombia
Absorción de agua	ASTM C 127	Perú
	EN 771-1:2003, BS EN 772-11,	Reino Unido, India
	IS: 3495, BS 1725	India, Kenia, Egipto
Propiedades de los plásticos	NBR 8492	Brasil, India
	ASTM C1116 (Fibras de micro propileno), ASTM D3039 (Correas de polipropileno), ASTM D6631-01 (geomalla), ASTM D1895 (PET), ASTM E1131-08 (polímero de fibra de vidrio)	Chile Irán, Brasil, Perú, Egipto, España

Standardization, 2011) utilizada por Salaou et al. (2021) y Sujatha & Selsia-Devi (2018). Para pruebas de infiltración, por ejemplo, se utiliza la norma EN 771-1:2003 (European Committee for Standardization, 2003) que, a pesar de ser emitida para especímenes de arcilla cocida, se utiliza en determinación de absorción y densidad para especímenes de suelo comprimido por Salaou et al. (2021), Salih et al. (2020a) y Sujatha & Selsia-Devi (2018).

Sin embargo, de manera general, en gran cantidad de los estudios abordados, se emplean las normas derivadas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) en alguna de sus nomenclaturas ASTM D (suelos) y ASTM C (concretos). Solo a modo de ejemplo, se indican las normas más relevantes presentes utilizadas para estudios de suelo (granulometría, contenido de humedad, límites de Atterberg, etc., y pruebas físico-mecánicas como compresión o absorción) como la ASTM C127 (ASTM International, 2015a), ASTM D6913 (ASTM International, 2017b) y ASTM D7928 (ASTM International, 2017c) para pruebas de absorción y densidad, ocupada por Gordillo-Monteza (2020), la ASTM C109 (ASTM International, 2016) utilizadas para agregados, dimensionamiento y pruebas físico-mecánicas por Nasrollahzadeh & Zare (2020) y Onochie & Balkis (2021), la ASTM D695 (ASTM International, 2015c) utilizada por Rabello & da Conceição-Ribeiro (2021) para granulometría y pruebas de compresión, la ASTM D5102-09 (ASTM International, 2009) usada por Muntohar et al. (2013) para pruebas de granulometría y cortante; o bien, la ASTM D1633-17 (ASTM International, 2017a) empleada por El-Emam & Al-Tamimi (2022) para granulometría y compresión. Y la ASTM C349 (ASTM International, 2015b), utilizada por Ahmad et al. (2022) y Burbano-Garcia et al. (2022) para pruebas de flexión.

## 5. PRUEBAS FISICOMECAÑICAS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En el análisis, se compara el valor correspondiente al sujeto de control (sin refuerzo) contra el valor correspondiente al sujeto mejorado (reforzado), y se analiza la variación porcentual (incremento o decremento) del sujeto mejorado respecto al de control. Esto se realiza acorde a las categorías de mortero y refuerzo utilizado según el tipo de prueba, de modo general (valor promedio según la categoría aplicable) y de modo particular (enfocándose en los valores de mejor y peor desempeño). Los días de secado se consideran de 7, 14 y 28 días, siendo este último valor el más utilizado, con algunas excepciones a 7 y 21 días y pruebas en suelo no consolidado (UCS). Se indica el porcentaje de incorporación de plástico en relación al peso seco del espécimen,  $Wt$  (%), el tipo de arreglo utilizado para la prueba, tipo de plástico empleado y la presentación del mismo.

### 5.1 Resistencia a la compresión

En la prueba de resistencia a compresión  $\sigma_c$  (MPa), se compara la resistencia a la compresión  $\sigma_{cc}$  (MPa) del sujeto patrón o de control vs el sujeto mejorado  $\sigma_{cm}$  (MPa), para obtener la variación porcentual de resistencia a compresión  $\Delta\sigma_c$  (%) (considerándose un valor positivo como favorable para este parámetro) según las categorías de refuerzo AS, AS + P, AS + C, ASC + P, AS + O y C + P, de modo general y particular. La prueba más utilizada para suelos consolidados es la prueba de compresión uniaxial. La expresión para calcular la  $\sigma_c$  se da por:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

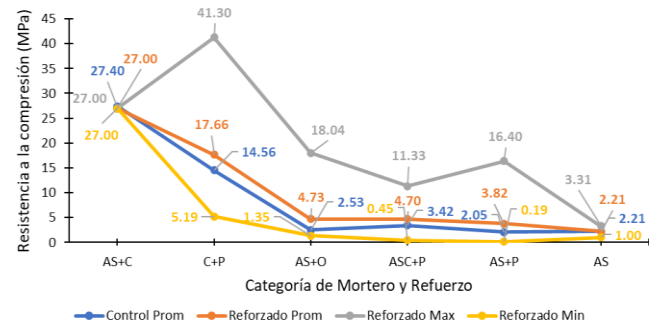


Figura 1. Resistencia a la compresión acorde a las categorías de refuerzo

Donde  $P_{max}$  (N) es la carga de compresión a ruptura aplicada, en y  $A$  ( $m^2$ ) es el área la sección transversal de la muestra. Para el caso de pruebas de UCS, se realiza por lo regular inmediatamente del vertido desde el molde del sujeto de prueba sin periodo de secado. La resistencia acorde a la norma NTP E.080 es de 0.6 MPa para adobes y de 6.86 MPa para bloques de concreto acorde a la norma NTP-E070, ambos secados a 28 días.

En la categoría AS, se abordan 3 estudios, cuyo refuerzo inherente es por definición paja indicado explícitamente (Illampas et al., 2014; Yetgin et al., 2008) e implícitamente (Gutiérrez-Villalobos et al., 2021). No existe sujeto de control, por lo cual  $\sigma_c = \sigma_{cc} = \sigma_{cm}$ ; se tiene un promedio de  $\sigma_c = 2.20$  MPa, con un valor máximo  $\sigma_c = 3.31$  MPa y  $\sigma_c = 1$  MPa mínimo es el obtenida por Illampas et al. (2014). Los máximos valores de  $\sigma_{cc}$  y  $\sigma_{cm}$  por categoría de refuerzo, así como los valores promedio, se indican en la Figura 1.

En la categoría AS + P, se analizan 32 estudios (Abad-Flores, 2020; Araya-Letelier et al., 2019a, 2019b; Ascencios-Mostacero, 2020; Ahmad et al., 2022; Aznarán-Monzón, 2018; Barturen-Payano, 2020; Bertelsen et al., 2021; Burbano-Garcia et al., 2022; Cadenas-Tacac et al., 2018; Cerna-Livia & Velásquez, 2021; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; El-Emam & Al-Tamimi, 2022; Inga-Castro, 2019; Lozano-Rios & Valle-Fernández, 2020; Menon & Ravikumar, 2019; Muntohar et al., 2013; Nasrollahzadeh & Zare, 2020; Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Onochie & Balkis, 2021; Paucar-Sevillano, 2018; Peña-Estrella & Niño-Santos, 2019; Quispe-Crises, 2017; Rabello & da Conceição-Ribeiro, 2021; Robalino-Sánchez, 2019; Salaou et al., 2021; Serrano et al., 2016; Subramania-Prasad, 2013; Subramania-Prasad et al., 2011; Sujatha & Selsia-Devi, 2018; Tavares & Magalhães, 2019; Vignesh et al., 2021). Los valores promedio en la categoría son  $\sigma_{cc} = 2.03$  MPa,  $\sigma_{cm} = 3.82$  MPa y  $\Delta\sigma_c = 95.37$  %.

De manera particular, Lozano Rios & Valle Fernández (2020) muestran el mayor valor de  $\Delta\sigma_c = 1015$  % y de  $\sigma_{cm} = 16.40$  MPa, usando fibra PET al 12 %. A su vez, el menor valor de  $\sigma_{cm}$  se da en el estudio de Muntohar et al. (2013), con 0.19 MPa debido a que se trata de UCS mediante la fibra de PP al 0.8 %. La menor resistencia para suelo consolidado se da en los estudios de Peña-Estrella & Niño-Santos (2019) y de Inga Castro (2019) con  $\sigma_{cm} = 1.10$  MPa. a través de tiras PET de 1" (sin concentración específica indicada) y Fibra de PE al 0.5 % como refuerzo, respectivamente. En este último



caso, con  $\Delta\sigma_c = 27.56\%$ . El menor valor de  $\Delta\sigma_c$  de da también en el estudio de Inga-Castro (2019), en que se usa como refuerzo PE rayado al 0.5 %, con  $\Delta\sigma_c = -27.56\%$ .

En la categoría  $AS + C$ , solo se tiene al estudio de Ruiz et al. (2018), con  $\sigma_{cc} = 27.30$  MPa. Éste estudio no contempla una comparativa vs adobe sin cemento, por lo que se toma al sujeto de control con 6 % de cemento, y al adobe mejorado con 6 % de cemento y una cubierta de madera, con una resistencia de  $\sigma_{cc} = 27.00$  MPa.

Para la categoría  $ASC + P$ , se analizaron 15 estudios (Araya-Letelier et al., 2019b; Binici et al., 2005, 2007; Consoli et al., 2002; Donkor & Obonyo, 2015; El-Emam & Al-Tamimi, 2022; Gordillo-Monteza, 2020; Guio-Pérez, 2019; Jayaram et al., 2021; Oliveira-Metzker et al., 2022; Paschoalin-Filho et al., 2016; Radwan et al., 2021; Subramania-Prasad, 2013; Subramania-Prasad et al., 2011; Vázquez-Greciano, 2018). Los promedios son  $\sigma_{cc} = 3.42$  MPa,  $\sigma_{cm} = 4.69$  MPa y  $\Delta\sigma_c = 93.94\%$ . Se destaca que este valor de  $\sigma_{cc}$  es 697.38 % menor al valor de  $\sigma_{cm}$  de la categoría  $AS + C$  al ser el mismo tipo de sujeto de prueba. Individualmente, el valor máximo  $\sigma_{cm} = 11.33$  MPa se obtiene en el estudio de Jayaram et al. (2021) utilizando como refuerzo PET virgen el pellet al 2 %, y el mayor  $\Delta\sigma_c = 850.42\%$  se presenta en el estudio de Guio-Pérez (2019), usando como refuerzo fibras PET concentradas al 1 %; mientras que la menor  $\sigma_{cm} = 0.45$  MPa se da en el estudio de Radwan et al. (2021), bajo una prueba UCS y usando fibra de PP al 0.15 %. Para el caso de pruebas ordinarias de compresión axial, en el estudio de Vázquez Greciano (2018) se presenta la menor  $\sigma_{cm} = 0.85$  MPa y  $\Delta\sigma_c = 52.77\%$ , la baja resistencia se debe quizá a usar al PET como refuerzo trenzado, no como fibra.

En la categoría  $C + P$ , se analizaron 11 estudios (Bailón-Espinoza & Huatuco-Cordova, 2021; Campos-Barboza et al., 2019; Ccansaya-Saldaña & Piña-Pereyra, 2021; Farias-Solano, 2019; Illampas et al., 2014; Islam et al., 2022; Khalid et al., 2020; Pérez-Collantes, 2021; Pérez-Pérez & Zamora-Fernández, 2020; Piñeros-Moreno & Herrera-Muriel, 2018; Sandoval-Saucedo & Guzmán-Hasegawa, 2019). Los valores promedio son  $\sigma_{cc} = 14.56$  MPa,  $\sigma_{cm} = 17.65$  MPa y  $\Delta\sigma_c = 25.24\%$ . Individualmente, el mayor valor  $\sigma_{cm} = 41.30$  MPa se presenta en el estudio de Khalid et al. (2020), donde se utiliza como refuerzo desecho de Conduit (sin cobre) al 0.5 %, a la vez que el menor  $\sigma_{cm} = 5.19$  MPa se presenta en el estudio de Piñeros-Moreno & Herrera-Muriel (2018) utilizando como refuerzo PET triturado al 25 %. El mayor  $\Delta\sigma_c = 126.07\%$ , se da para el estudio de Pérez-Pérez & Zamora-Fernández (2020) cuyo  $\sigma_{cm} = 6.73$  MPa, en bloques reforzados con fibra PET al 20 %, mientras que el menor  $\Delta\sigma_c = -6.06\%$  es para el estudio de Illampas et al. (2014), usando como refuerzo 5 % PP triturado, el cual llega a un valor de  $\sigma_{cm} = 11.37$  MPa.

En la categoría  $AS + O$ , se analizaron 16 estudios (Araya-Letelier et al., 2020; Ascencios-Mostacero, 2020; Binshad et al., 2018; Calatan et al., 2016; Chib & Sharma, 2021; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; El-Emam & Al-Tamimi, 2022; Galán-Marín et al., 2013; Gandia et al., 2019; Kasinikota & Tripura, 2021; Oliveira-Metzker et al., 2022; Rabello & da Conceição-Ribeiro, 2021; Salih et al., 2020a; Serrano et al., 2016; Sujatha & Selsia-Devi, 2018; Wang et al., 2020). Los valores promedio son de  $\sigma_{cc} = 2.53$  MPa,  $\sigma_{cm} =$

4.72 MPa y  $\Delta\sigma_c = 110.58\%$ . Individualmente, el mayor  $\sigma_{cm} = 18.04$  MPa es para adobe reforzado con yute al 1 %

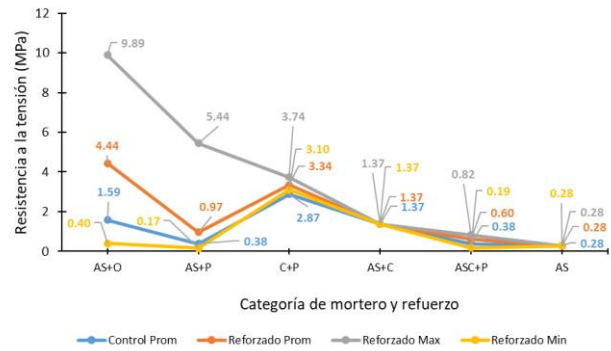


Figura 2. Resistencia a la tensión acorde a las categorías de refuerzo

(Sujatha & Selsia-Devi, 2018). La menor  $\sigma_{cm} = 1.35$  MPa se presenta en el estudio de Oliveira-Metzker et al. (2022) para adobe reforzado con desecho neumático y 10 % cemento. El mayor  $\Delta\sigma_c = 555.22\%$  se da en el estudio de Gandia et al. (2019), para adobe reforzado con fibra de vidrio al 10 %, pasando de  $\sigma_{cc} = 1.34$  MPa a  $\sigma_{cm} = 8.78$  MPa mientras que el menor valor de  $\Delta\sigma_c = -44.32\%$ , es para el estudio de Serrano et al. (2016) usando como refuerzo de hueso de aceituna al 5 %, pasando de  $\sigma_{cc} = 2.90$  MPa a  $\sigma_{cm} = 1.61$  MPa.

## 5.2 Resistencia a la tensión.

La resistencia a tensión  $\sigma_t$  (MPa) de adobes-suelo simple se obtiene en una proporción menor a la resistencia a la compresión. Esta propiedad se suele obtener por varios tipos de prueba: tensión directa, tensión bajo flexión o también llamada “bending tensile” bajo el método de ensayo “three-point bending” acorde a la norma EN 1015-11 (European Committee for Standardization, 2019), el ensayo brasileño a la tensión o “Indirect Split Tensile” (Wang et al., 2020; Muntohar et al., 2013), que consiste en comprimir un cilindro e inferir su resistencia a la tensión. La expresión para determinarla mediante este último método es:

$$\sigma_t = \frac{2P_{max}}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

Donde  $P_{max}$  (N) es la carga de compresión ruptura,  $L$  (m) es la longitud del cilindro y  $D$  (m) es el diámetro del cilindro. Sujatha & Selsia-Devi (2018) simplifica esta expresión a  $\sigma_t = \frac{0.648 P_{max}}{L \cdot D}$ ; o bien, para efectos prácticos, en algunos estudios sometidos a la norma peruana E.080, se redondea a  $\sigma_t = \frac{0.5 P_{max}}{L \cdot D}$  (Aznarán-Monzón, 2018; Barturen-Payano, 2020).

Para el análisis, se compara la resistencia a la tensión del sujeto de control  $\sigma_{tc}$  (MPa) vs la resistencia a la tensión del sujeto reforzado  $\sigma_{tm}$  (MPa) para obtener la variación porcentual de resistencia a la tensión  $\Delta\sigma_t$  (%). Al igual que en las pruebas de compresión, se clasifican los estudios por categorías de refuerzo:  $AS$ ,  $AS + P$ ,  $AS + C$ ,  $ASC + P$ ,  $C + P$  y  $AS + O$ .

Para la categoría  $AS$ , se tiene únicamente al estudio de Yetgin et al. (2008), cuya  $\sigma_t = 0.27$  MPa. Esto contrasta con la categoría  $AS + P$ , caracterizada por 6 estudios (Aznarán-

Monzón, 2018; Barturen-Payano, 2020; Muntohar et al., 2013; Salaou et al., 2021; Subramania-Prasad, 2013; Sujatha & Selsia-Devi, 2018), cuyos valores promedio son  $\sigma_{tc} = 0.37$  MPa y  $\sigma_{tm} = 0.96$  MPa y  $\Delta\sigma_t = 187.51$  %. La  $\sigma_{tm}$  promedio asciende a 1.12 MPa si se descarta el estudio de Muntohar et al. (2013), que caracteriza a un suelo no drenado reforzado con fibra de PP. Es de desatacar este estudio, pues a pesar de su baja resistencia a la tensión, el valor de  $\Delta\sigma_t = 766.66$  % es el mayor dentro la categoría. El menor valor de  $\Delta\sigma_t = 65.49$  % se presenta en el estudio de Aznarán-Monzón (2018), que caracteriza adobe reforzado con fibra PET. Los máximos valores de  $\sigma_{tc}$  y  $\sigma_{tm}$  por categoría de refuerzo, así como los valores promedio, se indican en la Figura 2.

Para el caso de  $AS + C$ , se tiene un único estudio (Ruiz et al., 2018), el refuerzo es cemento al 6 %. No se caracteriza un sujeto de control, por lo que se tiene únicamente  $\sigma_{tm} = 1.37$  MPa. Este valor es 260 % mayor al promedio de  $\sigma_{tc} = 0.38$  MPa de la categoría  $ASC + P$ , cuando debería ser similar dado que en ambos casos es un ladrillo  $ASC$ .

Para esta categoría  $ASC + P$ , se tienen 2 fuentes. El estudio de Subramania-Prasad (2013), en la que ensaya con mortero  $AS$  y cemento al 15 %, con refuerzos de fibra PET y bolsa de plástico, ambos al 0.2 % y el estudio de Consoli et al. (2002), que caracteriza mortero  $AS$  y cemento al 6.42 %, ensayando con refuerzo de fibra de plástico genérico al 0.78 %. Los promedios son  $\sigma_{tc} = 0.38$  MPa  $\sigma_{tm} = 0.60$  MPa y  $\Delta\sigma_t = 54.82$  %. La mayor  $\sigma_{tm} = 0.82$  MPa se da en el estudio de Subramania-Prasad (2013), y el menor valor de  $\sigma_{tm} = 0.18$  MPa en el estudio de Consoli et al. (2002), realizada para un suelo no drenado reforzado con fibra de bolsa de plástico al 0.78 %.

La categoría  $AS + O$  se representa por los estudios de Salih et al. (2020a), lo que caracteriza como refuerzos pluma de pollo y bagazo de caña de azúcar de Sujatha & Selsia-Devi (2018), que determinan como refuerzos fibra de vidrio AR y fibra de yute, y de Wang et al. (2020) especificando fibra de banana y fibra de basalto como refuerzo. Los promedios son  $\sigma_{tc} = 1.58$  MPa (contrasta que sea 476 % mayor que el  $\sigma_t$  de  $AS$  y 63.58 % mayor que el  $\sigma_{tc}$  promedio de  $AS + P$ , cuando en los 3 casos se trata de  $AS$  sin refuerzo),  $\sigma_{tm} = 4.44$  MPa y  $\Delta\sigma_t = 156.57$  %. Para esta categoría, el mayor valor de  $\sigma_{tm} = 9.89$  MPa y de  $\Delta\sigma_t = 415.10$  % es para el estudio de Sujatha & Selsia-Devi (2018), cuyo refuerzo es yute al 1 %. Este valor de  $\sigma_{tm}$  es mayor que el de los  $AS + P$  y  $ASC + P$ , e inclusive que la resistencia del  $C + P$ .

En la categoría  $C + P$ , se tienen los estudios de Khalid et al. (2020) en que se usa conduit al 0.5 % como refuerzo, e Islam et al. (2022), en que se usa refuerzo de fibra de PP nueva y usada, ambas al 0.5 %, los valores promedios son  $\sigma_{tc} = 2.87$  MPa,  $\sigma_{tm} = 3.34$  MPa y  $\Delta\sigma_t = 17.58$  %. El mayor valor de  $\sigma_{tm} = 3.74$  MPa se da en el estudio de Khalid et al. (2020) y el menor valor de  $\sigma_{tm} = 3.10$  MPa en el estudio de Islam et al. (2022).

### 5.3 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión  $\sigma_f$  (MPa) se determina por el ensayo de flexión a 3 puntos. La ecuación para calcularla de acuerdo a la UNE-EN 196-1 (UNE, 2018) es:

$$\sigma_f = 1.5 \cdot F_f \cdot l_f / b^3 \quad (3)$$

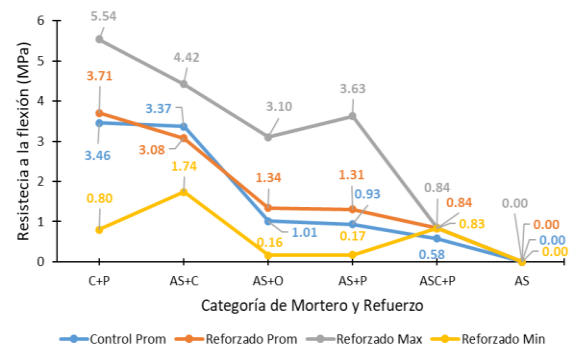


Figura 3. Resistencia a la flexión acorde a las categorías de refuerzo

donde  $F_f$  (N) es la fuerza de flexión al punto de ruptura,  $l_f$  (m) es la distancia entre los soportes y  $b$  (m) es la sección cuadrada del prisma. Esta norma establece que la  $\sigma_f$  mínima para bloques  $AS$  es de 0.35 MPa. Para el análisis, se compara la resistencia a la flexión del sujeto de control  $\sigma_{fc}$  (MPa) vs la resistencia a la flexión del sujeto reforzado  $\sigma_{fm}$  (MPa) para obtener la variación porcentual de resistencia a la flexión  $\Delta\sigma_f$  (%). Nuevamente, se clasifican los estudios por categorías de refuerzo:  $AS + P$ ,  $AS + C$ ,  $ASC + P$ ,  $C + P$  y  $AS + O$  (se omite  $AS$ , al no encontrarse estos ensayos en la literatura revisada).

Para la categoría  $AS + P$ , se contemplan 9 estudios (Ahmad et al., 2022; Araya-Letelier et al., 2019a; Ascencios-Mostacero, 2020; Bertelsen et al., 2021; Burbano-García et al., 2022; Candenas-Tacac et al., 2018; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Onochie & Balkis, 2021; Serrano et al., 2016). Son los valores promedio de  $\sigma_{fc} = 0.93$  MPa,  $\sigma_{fm} = 1.30$  MPa y  $\Delta\sigma_f = 31.09$  %, con el mayor valor de  $\sigma_{fm} = 3.62$  MPa y  $\Delta\sigma_f = 105.55$  % para el estudio de Candenas-Tacac et al. (2018), que determina el refuerzo fibra PET al 25 %; a su vez, el estudio de Serrano et al. (2016) especifica pellet de PU al 10 % como refuerzo, tiene el menor valor de  $\sigma_{fm} = 0.17$  MPa y  $\Delta\sigma_f = -42.14$  %. Los máximos valores de  $\sigma_{fc}$  y  $\sigma_{fm}$  por categoría de refuerzo, así como los valores promedio, se indican en la Figura 3.

En la categoría  $AS + C$ , se tienen dos estudios (Goutsaya et al., 2021; Ruiz et al., 2018). Los valores promedio son  $\sigma_{fc} = 3.37$  MPa y  $\sigma_{fm} = 3.37$  MPa a una  $\sigma_{fm} = 3.08$  MPa, con un valor máximo de  $\sigma_{fc} = 3.37$  MPa para el primer estudio, reportando a su vez un  $\Delta\sigma_f = 31.15$  % a una concentración 8 % de cemento.

De la categoría  $ASC + P$  representada por los estudios de Donkor & Obonyo (2015) y Donkor et al. (2021) (en ambos el mortero usa cemento al 8 % y fibra de PP como refuerzo al 0.4 % y 0.6 % respectivamente), los valores promedio son  $\sigma_{fc} = 0.57$  MPa, y  $\sigma_{fm} = 0.83$  MPa (271 % menor a la  $\sigma_{fm}$  de  $AS + C$ , a pesar de tratarse del mismo mortero) y  $\Delta\sigma_f = 50.39$  %. Los valores de  $\sigma_{fm}$  de ambos estudios son prácticamente idénticos (0.83 MPa y 0.84 MPa respectivamente), confirmando la consistencia de los estudios.

En la categoría  $AS + O$ , se tienen 7 estudios (Araya-Letelier et al., 2020; Ascencios-Mostacero, 2020; Calatan et al., 2016; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Galán-Marín et al., 2013; Kasinikota & Tripura, 2021; Serrano et al., 2016). Los valores promedio son  $\sigma_{fc} = 1.01$  MPa,  $\sigma_{fm} = 1.34$  MPa y  $\Delta\sigma_f = 26.52\%$ . El mayor valor de  $\sigma_{fm} = 3.1$  MPa se da en el estudio de Calatan et al. (2016), que caracteriza cañamo al 15 % como refuerzo. El mayor  $\Delta\sigma_f = 102.34\%$  es para el estudio de Serrano et al. (2016), que utiliza festuca al 1 %, a la vez que el menor valor de  $\sigma_{fm} = 0.164$  MPa y  $\Delta\sigma_f = -45.15\%$  se caracteriza también en este estudio, con hueso de aceituna como refuerzo al 5 % (valor similar de  $\Delta\sigma_f$  en el mismo estudio para pruebas de compresión).

Para la categoría  $C + P$ , se tienen los estudios de Di Marco-Morales & León-Téllez (2017), Islam et al. (2022), Márquez-Domínguez et al. (2018) y Meza-de Luna et al. (2021). Los valores promedio son  $\sigma_{fc} = 3.46$  MPa,  $\sigma_{fm} = 3.70$  MPa y  $\Delta\sigma_f = 26.76\%$ . El valor máximo de  $\sigma_{fm} = 5.54$  MPa se da en el estudio de Márquez-Domínguez et al. (2018), con tiras PET como refuerzo (no se indica la concentración). Este valor es el mayor de  $\sigma_{fm}$  en todas las categorías de esta prueba. Individualmente, el mayor valor de  $\Delta\sigma_f = 100\%$  está en el estudio de Meza-de Luna et al. (2021), que caracteriza como refuerzo fibra PET al 25 %, y el menor  $\Delta\sigma_f = -17.30\%$  se tiene en el estudio de Di Marco-Morales & León-Téllez (2017), que caracteriza fibra PET al 20 % como refuerzo.

#### 5.4 Resistencia a cortante

La resistencia a la cortante  $\sigma_s$  (MPa) comúnmente se determina de manera indirecta por la prueba de compresión diagonal, acorde a Cerna-Livia & Velásquez (2021) y a la norma peruana NTP E.080. La expresión para determinar  $\sigma_s$  es:

$$\sigma_s = \frac{P}{2 \cdot a \cdot e_m} \quad (4)$$

Donde  $P$  (N) es la carga diagonal, aplicada al bloque o al murete (cuadrado),  $a$  (m) es la medida de uno de los lados del murete y  $e_m$  (m) es el grosor del murete. La resistencia mínima es de  $0.25 \text{ kg/cm}^2$  ( $2.45 \times 10^{-2}$  MPa), acorde a la Norma Peruana E.080. La prueba anteriormente mencionada es aplicada en los estudios de las categorías  $AS + P$ ,  $C + P$ , y en el estudio de Correa-Carlos & Puican-Cumpa (2021) de la categoría  $AS + O$ . En los estudios de las otras categorías,  $\sigma_s$  se determina mediante las pruebas UCS y de cortante directa. Para el presente análisis, se considera la comparativa de la resistencia a cortante de los sujetos de control  $\sigma_{sc}$  (MPa) vs la resistencia a cortante de los sujetos mejorados  $\sigma_{sm}$  (MPa), para obtener la variación porcentual de resistencia a cortante  $\Delta\sigma_s$  (%). Dada la escasez de estudios para este tipo de prueba, únicamente se consideran las 3 categorías anteriormente mencionadas.

En la categoría  $AS + P$  se abordan 7 estudios (Candenas-Tacac et al., 2018; Cerna-Livia & Velásquez, 2021; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Menon & Ravikumar, 2019; Mir & Shah, 2019; Muntohar et al., 2013; Salaou et al., 2021). Son los valores promedio de  $\sigma_{sc} = 0.49$  MPa,  $\sigma_{sm} = 0.93$  MPa y  $\Delta\sigma_s = 708.67\%$ . El menor valor de  $\sigma_s$  es para el estudio de

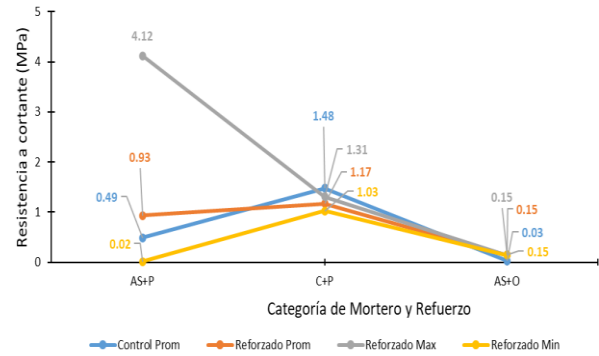


Figura 4. Resistencia a cortante acorde a las categorías de refuerzo

Mir & Shah (2019), en el que se utilizan 3 tiras de PET como refuerzo resultando en una  $\sigma_{sc} = 6.40 \times 10^{-3}$  MPa y  $\sigma_{sm} = 1.75 \times 10^{-2}$  MPa. Esta baja resistencia se debe quizá a que el mortero base es arena; sin embargo, para este caso se puede observar un  $\Delta\sigma_s = 173\%$ , casi el doble que la  $\Delta\sigma_s$  promedio de la categoría, lo que indica que el refuerzo con PET aplicado a arena tiene un gran efecto en el aumento de resistencia a cortante. Los máximos valores de  $\sigma_{sc}$  y  $\sigma_{sm}$  por categoría de refuerzo, así como los valores promedio, y se indican en la Figura 4, destacando que el mayor valor de  $\sigma_{sm} = 4.11$  MPa dentro de esta y todas las categorías es para el estudio de Candenas-Tacac et al. (2018) con fibra PET al 30 % como refuerzo y un  $\Delta\sigma_s = 90.91\%$ , respecto a  $\sigma_{sc} = 2.15$  MPa. Sin embargo, el mayor  $\Delta\sigma_s = 4454.54\%$ , se da en el estudio de Muntohar et al. (2013) caracterizando refuerzo de fibra de polipropileno al 0.4 % para un estudio de suelo no drenado. La categoría  $C + P$  es representada por los estudios de Illampas et al. (2014) y de Pérez-Collantes (2021) en donde el refuerzo es polipropileno triturado al 5 % y PET triturado al 10 %, respectivamente. Los valores promedio son  $\sigma_{sc} = 1.47$  MPa,  $\sigma_{sm} = 1.16$  MPa y  $\Delta\sigma_s = -21.03\%$ . Este caso de reducción en las dos referencias podría indicar que los refuerzos plásticos reducen la resistencia cortante en el concreto, aunque se deben realizar más estudios al respecto. En la categoría  $AS + O$ , se tiene únicamente al estudio de Correa-Carlos & Puican-Cumpa (2021) en que el refuerzo es fibra de cabuya (maguey) al 4 %. Se pasa de  $\sigma_{sc} = 0.03$  MPa a  $\sigma_{sm} = 0.14$  MPa, (un  $\Delta\sigma_s = 358\%$ ), mayor al  $\Delta\sigma_s$  promedio general de la categoría  $AS + P$  (a pesar que en ésta se encuentra el mayor valor de  $\sigma_{sm}$  debido al estudio de Candenas-Tacac et al. (2018), pero menor aún al  $\Delta\sigma_s$  del estudio de Muntohar et al. (2013).

#### 5.5 Otras pruebas: Densidad, aislamiento térmico, y absorción de agua

Las pruebas de desempeño físico, a pesar de ser de secundarias, por lo general cobran especial relevancia cuando se elaboran prototipos destinados a condiciones específicas de vivienda y zona de aplicación.

##### 5.5.1 Densidad

La densidad  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) se determina por la ecuación:

$$\rho = m/V \quad (5)$$

Donde  $m$  (kg) es la masa del espécimen de prueba: adobe, masa de suelo o ladrillo seco o, en su caso, de suelo no drenado; y  $V$  ( $m^3$ ) es el volumen del sujeto. La  $\rho$  se obtiene tanto para el sujeto de control  $\rho_c$  ( $kg/m^3$ ), así como para el sujeto reforzado  $\rho_m$  ( $kg/m^3$ ) y la variación porcentual de densidad  $\Delta\rho$  (%). Asimismo, se obtienen los valores promedio para las categorías analizadas  $AS$ ,  $AS + P$ ,  $ASC + P$ ,  $C + P$  y  $AS + O$ . Se considera que un sujeto reforzado obtiene un desempeño favorable si  $\rho_m$  se reduce respecto a  $\rho_c$ ; es decir, se desea un valor negativo de  $\Delta\rho$ .

Para la categoría  $AS$  se resaltan los estudios de Gama-Castro et al. (2012) y de Gutiérrez-Villalobos et al. (2021) (éste último realizado para adobes del centro y sudeste de México en pruebas destructivas y no destructivas). El promedio de  $\rho$  es  $\rho = 1361.13 \frac{kg}{m^3}$ . La categoría  $AS + P$  es caracterizada por 6 estudios (Bertelsen et al., 2021; Burbano-García et al., 2022; Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Subramania-Prasad, 2013; Subramania-Prasad et al., 2011; Sujatha & Selsia-Devi, 2018), siendo los valores promedio de  $\rho_c = 1852.28 kg/m^3$  (35.64 % mayor a  $\rho_c$  de la categoría  $AS$ ),  $\rho_m = 1738.57 kg/m^3$  y  $\Delta\rho = -6.29$  %. El estudio con mejor desempeño para esta categoría es el de Noa-Huaman & Ordoñez-Claros (2022), el cual incorpora 6 % de fibras PET, con la mayor reducción de densidad  $\Delta\rho = -16.33$  % y con el menor valor de  $\rho_m = 1280 kg/m^3$  de esta clasificación. El mayor valor de  $\rho_m = 1897 kg/m^3$  en esta categoría lo tiene el estudio de Subramania-Prasad (2013), para refuerzo de fibra PET al 0,2%, esto se debe a que el adobe fue manufacturado con una presión de moldeado de 7.5 MPa. Los máximos valores de  $\rho_c$  y  $\rho_m$  por categoría de refuerzo, así como los valores promedio, se indican en la Figura 5.

La categoría  $ASC + P$  se representa por 4 estudios (Guio-Pérez, 2019; Oliveira-Metzker et al., 2022; Subramania-Prasad, 2013; Subramania-Prasad et al., 2011), siendo los valores promedio de  $\rho_c = 1781.25 kg/m^3$ ,  $\rho_m = 1748.50 kg/m^3$  y  $\Delta\rho = -1.88$  %. En todos los casos, se observa reducción de la densidad, con el mayor valor para el estudio de Guio-Pérez (2019), que incorpora fibra PET al 1 %, con 6 % de contenido de cemento, con  $\Delta\rho = -3.63$  %. Esto es consistente con la tendencia indicada por Radwan et al. (2021), donde se indica que a mayor cantidad de incorporación de cemento, se incrementa la densidad del adobe (a partir del 10 % de contenido de cemento, se observa  $\Delta\rho_m$  de  $100 kg/m^3$ , por cada 10 % de incremento de contenido de cemento).

Para la categoría  $C + P$ , se tiene únicamente el estudio de Farias-Solano (2019), que evalúa como refuerzo la fibra PET al 30 %, con valores de  $\rho_c = 2180 kg/m^3$ ,  $\rho_m = 2060 kg/m^3$  y  $\Delta\rho = -5,50$  %. Es de destacar que el valor de  $\rho_c$  es 37.56 % mayor que el correspondiente del adobe puro.

Finalmente, para  $AS + O$  se tienen 7 estudios (Araya-Letelier et al., 2020; Calatan et al., 2016; Gandia et al., 2019; Oliveira-Metzker et al., 2022; Rabello & da Conceição-Ribeiro, 2021; Salih et al., 2020a; Sujatha & Selsia-Devi, 2018), siendo el valor promedio de  $\rho_c = 1630.60 kg/m^3$ ,  $\rho_m = 1433.67 kg/m^3$  y  $\Delta\rho = -12.56$  %. En todos los casos, existe una reducción del valor de densidad, con el mejor desempeño para el estudio de Calatan et al. (2016) ( $\Delta\rho = -25.59$  %), con 40 % de incorporación de paja como refuerzo (en este caso, la

incorporación no se da en porcentaje de peso seco como en el resto de los estudios, sino como porcentaje de volumen). Es de notar que la paja como refuerzo de  $AS$  proporciona el mejor desempeño de reducción de densidad, incrementando también su resistencia a la flexión en 51.51 % pero reduciendo en

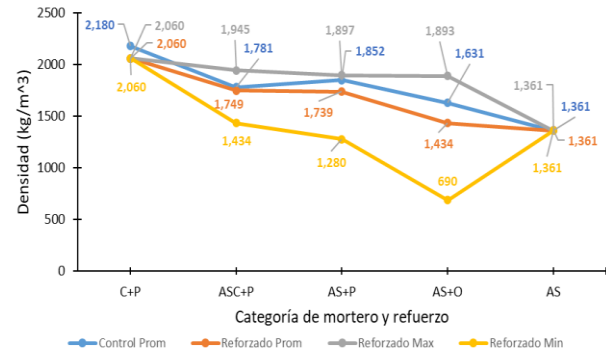


Figura 5. Densidad acorde a las categorías de refuerzo

4.87 % su resistencia a la compresión, por lo que no necesariamente el mejoramiento de propiedades físicas está ligado al mejoramiento de propiedades mecánicas (ver Figura 8).

### 5.5.2 Aislamiento térmico

Este parámetro no es siempre determinable bajo los mismos términos, en algunos estudios (Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Núñez-Aldás et al., 2021; Oliveira-Metzker et al., 2022) se caracteriza como conductividad térmica o aislamiento térmico, que se evalúa como la cantidad de calor que pasa por unidad de volumen; se representa por el coeficiente de conductividad térmica  $\lambda$  ( $w/m \cdot K$ ), expresado en la siguiente ecuación, acorde a las normas NCh 851 (Instituto Nacional de Normalización, 2008) y ABNT 2008 (ABNT, 2008).

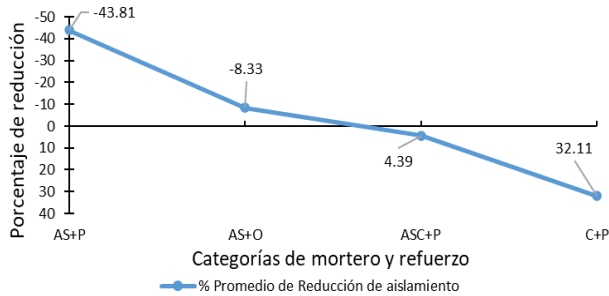
$$\lambda = \frac{d \cdot P}{A \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Donde:  $d$  (m) es el grosor del espécimen,  $P$  ( $W/m^2$ ) es la radiación por unidad de área,  $A$  ( $m^2$ ) es el área de la sección transversal y  $\Delta t$  (K) o ( $^{\circ}C$ ) es la variación de temperatura entre las caras opuestas del espécimen.

Las pruebas de transferencia de calor/aislamiento térmico tienen como propósito la reducción del valor del coeficiente obtenido; pues entre menor sea este valor, se considera a la unidad de construcción como un mejor aislante. Por lo tanto, para el análisis, se compara el aislamiento térmico del sujeto de control  $\lambda_c$  ( $w/m K$ ) contra la el aislamiento térmico del sujeto reforzado  $\lambda_m$  ( $w/m K$ ) en las categorías  $AS + P$ ,  $ASC + P$ ,  $C + P$  y  $AS + O$ , a través del porcentaje de reducción de conductividad térmica ( $\Delta\lambda$ ), que es el cambio porcentual entre  $\lambda_c$  y  $\lambda_m$ . El comportamiento general de las categorías analizadas para  $\Delta\lambda$ , se muestra en la Figura 6.

En la categoría  $AS + P$ , no se analizan las mismas unidades para estos estudios. En los trabajos de Noa-Huaman & Ordoñez-Claros (2022), Núñez-Aldás et al. (2021), y de Rabello & da Conceição-Ribeiro (2021), se analiza en ( $w/m K$ ), mientras que Inga Castro (2019) utiliza ( $^{\circ}C/h$ ). Sin

embargo, es posible obtener un valor promedio para la categoría de  $\Delta\lambda = -43.81\%$ , cuyo mejor desempeño se presenta en el estudio de Rabello & da Conceição-Ribeiro (2021) con  $\Delta\lambda = -93\%$  usando como refuerzo vermiculita aligerada reforzada con resina de poliuretano vegetal al 10 %.



**Figura 6.** Porcentaje promedio de reducción de aislamiento térmico acorde a las categorías de refuerzo

En la categoría *ASC + P*, se tiene al estudio de Oliveira-Metzker et al. (2022) en donde se caracteriza como refuerzo tiras PET al 1.5 % cuyo contenido de cemento en el mortero es 10 %; se observa  $\Delta\lambda = -11.94\%$ . También se tiene el estudio de Binici et al. (2007), que caracteriza dos tipos de refuerzo: fibra de plástico genérico al 0.2 % y tela de PET al 0.4 %, con 10 % de contenido de cemento en el mortero, con  $\Delta\lambda = 13.02\%$  y  $\Delta\lambda = 12.09\%$ , respectivamente. El promedio para la categoría es de  $\Delta\lambda = 4.39\%$ . Este comportamiento de incremento de  $\lambda$  se da también para el único estudio de la categoría *C + P*, (Dueñas et al., 2021), que analiza el cemento reforzado con plástico (PET) en días soleados y nubosos, con valores de  $\Delta\lambda = 35.1\%$  y  $\Delta\lambda = 27.5\%$ , respectivamente, resultando en un promedio de  $\Delta\lambda = 31.8\%$  para la categoría. En este caso, el desempeño del refuerzo no es el esperado.

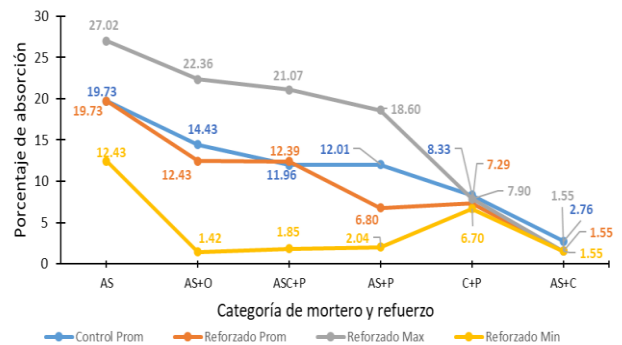
En la categoría *AS + O*, se analizan los estudios de Calatan et al. (2016), Gandia et al. (2019) y Oliveira-Metzker et al. (2022). En los tres trabajos, se presentan valores negativos para los diferentes refuerzos, siendo estos  $\Delta\lambda = -20.93\%$  para fibra de vidrio,  $\Delta\lambda = -18.42\%$  para paja y  $\Delta\lambda = -10.14\%$  para neumático triturado con cemento respectivamente. En el trabajo de Calatan et al. (2016), se presenta un segundo estudio de adobe- suelo con cáñamo como refuerzo, donde se tiene un  $\Delta\lambda = 16.15\%$ , resultando en un valor promedio  $\Delta\lambda = -8.33\%$  para la categoría. La comparativa entre el promedio de  $\Delta\lambda$ , se agrega también en comparación con otros porcentajes de incremento en la Figura 8.

### 5.5.3 Porcentaje de absorción de agua

El porcentaje de absorción de agua  $W_A$  (%) es una propiedad adimensional que mide la cantidad de agua que una unidad de construcción puede absorber, respecto a su peso seco. De acuerdo con Onochie & Balkis (2021),  $W_A$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$W_A = ((M_H - M_S)/M_S) \times 100 \quad (7)$$

donde  $M_H$  (kg) es el peso húmedo del adobe y  $M_S$  (kg) es el peso seco. Para el caso de esta propiedad, el objetivo es reducir el valor de  $W_A$ , a fin de evitar efectos nocivos como degradación por erosión hídrica, acumulación de humedad en la construcción y disminución de resistencia mecánica. La reducción de este valor (favorable en caso de ser negativo) se cuantifica también de manera porcentual y se expresa como  $\Delta W_A$  (%), en referencia al valor del sujeto de control  $W_{AC}$  (%) vs el mejorado  $W_{AM}$  (%). Las categorías analizadas son *AS*, *AS + P*, *ASC + P*, *C + P* y *AS + O*.

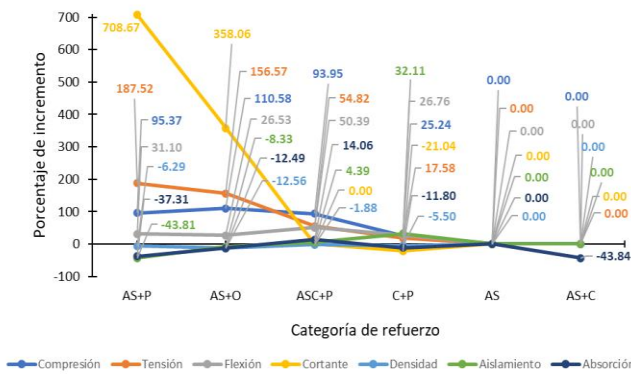


**Figura 7.** Porcentaje de absorción acorde a las categorías de refuerzo

Para la categoría *AS*, el estudio de Gama-Castro et al. (2012) es el único caracterizado, con 2 diferentes presiones de moldeado, observándose la directa influencia de este tratamiento para reducir  $W_A$ . Se pasa de  $W_A = 27.02\%$  a  $3.30 \times 10^{-2}$  MPa de presión de moldeado a  $W_A = 12.43\%$  a 1.50 MPa de presión de moldeado. El valor promedio es considerado como de control y mejorado, dado que se trata del mismo espécimen. Dentro de todas las categorías, los valores más altos de absorción los tienen los adobes simples, tal como se puede observar en la Figura 7

En la categoría *AS + P*, se analizan 9 estudios (Abad-Flores, 2020; Ascencios-Mostacero, 2020; Correa-Carlos & Puican-Cumpa, 2021; Noa-Huaman & Ordoñez-Claros, 2022; Paucar-Sevillano, 2018; Salaou et al., 2021; Sujatha & Selsia-Devi, 2018; Vignesh et al., 2021). Particularmente en el estudio de Salaou et al. (2021), que caracteriza a fibra de polipropileno al 0.4 %, no se determina  $W_A$ , sino un parámetro conocido como tasa de absorción de agua, con valores de  $0.41 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$  y  $0.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$  para el sujeto de control y mejorado respectivamente, por lo que no se analiza en conjunto con los otros estudios. Para el resto de los ellos, el  $W_{AC}$  promedio es de 12.01 % y  $W_{AM}$  promedio de 6.80 %, con un promedio de  $\Delta W_A$  de  $-37.31\%$ . El mayor valor de reducción de  $\Delta W_A = -71.42\%$ , se obtiene para el estudio de Vignesh et al. (2021), que caracteriza adobe reforzado con monofilamentos PET al 0.5 % y presión de moldeado de 15 MPa. En el estudio de Abad-Flores (2020)  $\Delta W_A = -89.10\%$ ; sin embargo, se debe resaltar que se trata de una extrapolación de los resultados presentados por Paucar-Sevillano (2018). El peor desempeño es para el estudio de Correa-Carlos & Puican-Cumpa (2021), con  $\Delta W_{AM} = 67.28\%$ , para adobe reforzado con fibras de PET al 2 %, sin indicar una presión de moldeado específica. El único estudio de absorción de agua para *AS + C* es el de Goutsaya et al. (2021) reforzado al 8 % con una presión de

moldeado de 3 MPa. Se obtiene  $\Delta W_A = -43.84\%$ , pasando de  $W_{AC} = 2.76\%$  a  $W_{AM} = 1.55\%$ .



**Figura 8.** Comparativa de variación de las propiedades físico-mecánicas respecto al tipo de refuerzo

La categoría *ASC + P* la representan 5 estudios (Jayaram et al., 2021; Oliveira-Metzker et al., 2022; Paschoalin-Filho et al., 2016; Subramania-Prasad, 2013; Subramania-Prasad et al., 2014). En este caso,  $W_{AC}$  promedio es de 11.96 %,  $W_{AM}$  promedio de 12.38 % y un promedio de  $\Delta W_A = 14.05\%$ . Esto se debe a que en los últimos 3 estudios la incorporación de fibras tiene un efecto no favorable en el adobe, incrementando  $W_{AM}$ , a pesar de la alta presión de 7.5 MPa de moldeado a la que se someten los especímenes. El peor desempeño se presenta en el estudio de Subramania-Prasad (2013) y en el estudio de Subramania-Prasad et al. (2014), con  $\Delta W_A = 29.28\%$  que pasa de  $W_{AC} = 7\%$  a  $W_{AM} = 9.05\%$ , al reforzar ASC al 15 % de cemento y con fibra PET reciclado de 1 cm al 0.1 % en ambos casos. En el estudio de Jayaram et al. (2021), donde el refuerzo es plástico virgen al 2 % y el contenido de cemento en el mortero del 16.7 %, no se aplica presión de moldeado. Este último estudio tiene los valores más pequeños de  $W_{AC}$  y  $W_{AM}$  (1.52 % y 1.85 % respectivamente), aun cuando no se aplica presión de moldeado. El mejor desempeño en esta categoría se da en el estudio de Paschoalin-Filho et al. (2016) en el que se estudia el refuerzo de hojuela de PET triturado al 10 % en mortero ASC con 25 % de contenido de cemento, con una  $\Delta W_A = -10.28\%$ , pasando de  $W_{AC} = 21.4\%$  a  $W_{AM} = 19.2\%$ .

Los estudios de Campos-Barboza et al. (2019), Ccansaya-Saldaña & Piña-Pereyra (2021), Di Marco-Morales & León-Téllez (2017) y Farias-Solano (2019) y de representan la categoría *C + P*. El valor promedio de  $W_{AC}$  y  $W_{AM}$  es de 8.32 % y de 7.28 %, respectivamente, y el promedio  $\Delta W_A = -11.79\%$ , con reducción para todos los estudios. En ninguno de los especímenes se aplica presión de moldeado, dadas las condiciones de moldeado y fraguado de concreto. El mejor desempeño es para el estudio de Farias-Solano (2019), con una  $\Delta W_A$  de  $-26.37\%$ , pasando de  $W_{AC} = 9.1\%$  a  $W_{AM} = 6.7\%$ , usando PET triturado al 30 %.

En el caso de la categoría *AS + O* descrita por los estudios de Ascencios-Mostacero (2020), Correa-Carlos & Puican-Cumpa (2021), Gandia et al. (2019), Kasinikota & Tripura (2021), Oliveira-Metzker et al. (2022), Rabello & da Conceição-Ribeiro (2021), Salih et al. (2020a) y Sujatha & Selsia-Devi (2018), el valor promedio de  $W_{AC}$  es de 14.42 %, mientras que  $W_{AM}$  promedio es de 12.43 %, y un promedio  $\Delta W_A = -12.49\%$ . El peor desempeño en cuanto a reducción por

refuerzo lo muestra el estudio de Gandia et al. (2019) caracterizando suelo reforzado al 5 % con fibra de vidrio AR, con  $\Delta W_A = 33.88\%$  pasando de  $W_{AC} = 9.62\%$  a  $W_{AM} = 12.88\%$ , mientras que el mejor desempeño dentro de esta y todas las categorías es para vermiculita reforzada al 30 % con resina de poliuretano vegetal, pasando de  $W_{AC} = 8.31\%$  a  $W_{AM} = 1.42\%$ , lo que da como resultado  $\Delta W_A = -82.91\%$ . Esto tal vez debido a que la resina permea dentro de los poros del bloque, impidiendo el paso del agua.

## 6. CONCLUSIONES

Mediante este trabajo de revisión se determinó la relación general entre la variación de las propiedades físico-mecánicas de unidades de construcción de adobe-suelo-cemento y concreto ante la aplicación de refuerzos diversos. Esto será de utilidad en la investigación del efecto de nuevos tipos de refuerzo a especímenes de suelo y concreto, para mejorar el desempeño de los mismos, a la vez que se obtiene un criterio general de aplicación de los datos reportados, en aplicaciones diversas de construcción y de ingeniería. A continuación, se indican las conclusiones específicas por criterio de desempeño.

### 6.1 Resistencia a la compresión

De manera general, los valores promedio de los sujetos de control y los sujetos mejorados superan la  $\sigma_c$  establecida por norma. Con la incorporación de cemento en el mortero base y como refuerzo se obtienen los mayores valores  $\sigma_c$ , con valores cercanos a los necesarios por norma (6.86 MPa) para especímenes de concreto puro. La incorporación de refuerzos plásticos y otros diversos implican valores de  $\Delta\sigma_c$  similares en especímenes de mortero *AS* y *ASC*, (con una variación entre ellos del 1.42 %) siendo ligeramente mayor al reforzar con vegetales (15.21 % y 16.63 % mejor respecto a refuerzos plásticos en morteros *AS* y *ASC* respectivamente). El efecto en el  $\Delta\sigma_c$  al incorporar plásticos en concreto es menor al observado en especímenes *AS* y *ASC*, tal cual se observa en la Figura 8

### 6.2 Resistencia a la tensión

Los mayores valores de  $\sigma_{tm}$  promedio se dan en orden descendente en las categorías *AS + O*, *C + P*, *ASC + P*, *AS + C*, *AS + P*, y *AS*, respectivamente. De manera individual, el *AS* reforzado con yute ofrece el mayor valor de  $\sigma_{tm} = 415.10\%$  y  $\Delta\sigma_t = 415.10\%$  de todas las categorías analizadas. Se puede inferir que la incorporación general de refuerzos al *AS* tiene similares efectos de  $\Delta\sigma_t$ . No así para morteros *ASC* y *C*, notando que, a mayor cantidad de cemento, menor es el impacto de los refuerzos plásticos, tal como se muestra en las Figuras 2 y 8.

### 6.3 Resistencia a flexión

La mayor  $\sigma_{fm}$  promedio y  $\sigma_{fm}$  máxima (individual) por categorías es para *C + P*; seguido por *AS + C*, *AS + O*, *AS + P* y *ASC + P*, superando en lo general el valor de resistencia a la flexión mínima por norma (0.35 MPa). El promedio de

$\Delta\sigma_f$  para  $AS + P$ ,  $AS + C$  y  $AS + O$  es similar, lo que se puede indicar que el aumento de resistencia a la flexión en especímenes  $AS$  es similar sin importar el tipo de refuerzo. La incorporación de plástico en el mortero  $ASC$  implica el  $\Delta\sigma_f$  promedio más alto de todas las categorías (50.9 %), mientras que para especímenes de  $C$  es menor (26.76 %), y no se observa una clara relación en el mejoramiento de resistencia al incorporar de plástico en  $C$  y  $ASC$ , pero similar al incorporar plástico en  $C$  y refuerzos generales en  $AS$  (incremento de 26.76 % y 26.52 % respectivamente).

#### 6.4 Resistencia cortante

En todas las categorías, los valores promedio de  $\sigma_{sc}$  y  $\sigma_{sm}$  superan el valor de la resistencia mínima por norma ( $2.45 \times 10^{-2}$  MPa, excepto el estudio de Mir & Shah (2019b)). La categoría  $AS + P$  tiene los estudios con mayor y menor resistencia (4.11 MPa y 0.0175 MPa, respectivamente), pero la mayor  $\sigma_{sm}$  promedio da en la categoría  $C + P$  (1.16 MPa). A pesar de la escasa cantidad de estudios, se puede indicar que la incorporación de plásticos (y cabuya para las categorías  $AS + O$ ) tiene un efecto positivo en el  $\Delta\sigma_s$  del  $AS$ , en similar proporción al  $\Delta\sigma_c$  para este mortero. En el caso del concreto, la incorporación de plásticos como refuerzo reduce la  $\sigma_{sm}$  (-21 %).

#### 6.5 Densidad

La mayor  $\rho_m$  promedio e individual por categorías se da en  $C + P$ , seguido de  $ASC + P$ ,  $AS + P$ ,  $AS + O$  y  $AS$ , lo que indica que el contenido de cemento es proporcional a la densidad, en tanto que, en lo general, todos los especímenes reforzados tienen menor densidad que los especímenes  $AS$ , tal como se puede observar en la Figura 8. Así, el efecto de refuerzos en todas las categorías tiende a ser a reducción tal como se pretende, siendo el menor  $\Delta\rho$  en  $AS + O$ , seguido de  $AS + P$ ,  $C + P$  y  $ASC + P$ . (-12.56 %, -6.29 %, -5.50 % y -1.88 % respectivamente), por lo que la incorporación de vegetales tiende a ejercer un mayor efecto en la reducción de densidad, seguido de plásticos. A su vez, los plásticos tienen mayor efecto de reducción de densidad en morteros  $AS$ ,  $C$  y  $ASC$  respectivamente.

#### 6.6 Aislamiento térmico

En los estudios analizados, los valores de  $\lambda$  se plasman con unidades de medida no equivalentes, lo que dificulta su análisis, pero en todos los casos abordados se puede determinar el  $\Delta\lambda$ . El mejor desempeño por categoría es para  $AS + P$ , seguido de  $AS + O$ ,  $ASC + P$  y  $C + P$  respectivamente (Figura 6), lo cual muestra que el contenido de cemento en el mortero base aumenta el valor de  $\lambda$ , por lo que no se recomienda como un material aislante.

#### 6.7 Absorción de agua

Los mayores valores promedio de absorción para sujetos reforzados y de control se dan en adobes en  $AS$ , seguido de  $AS + O$ ,  $ASC + P$ ,  $AS + P$ ,  $C + P$  y  $AS + C$ . Esto se debe probablemente a que el suelo es más permeable que el

cemento, así como las fibras vegetales retienen mayor humedad, y las fibras plásticas son impermeables.

Por otro lado, los mayores valores promedio de  $\Delta W_A$  se dan en  $ASC + P$  (esta categoría tiene el único valor positivo), seguido de  $C + P$ ,  $AS + O$ ,  $AS + P$  y  $AS + C$ , todos negativos con el último caso el de mejor desempeño (mayor reducción). No parece haber una tendencia hacia algún tipo de refuerzo a incrementar o reducir  $W_A$ . Es de destacar el estudio con mayor porcentaje de reducción de absorción  $\Delta W_A$ , así como de  $\Delta\rho$  y  $\Delta\lambda$  (-82.91 %, -23.8 % y -18 %, respectivamente) es el de Rabello & da Conceição-Ribeiro (2021), lo que caracteriza vermiculita con resina de poliuretano vegetal. Como se observa en la Figura 8, la reducción o aumento de la absorción no parece tener una correlación entre otras propiedades mecánicas.

## 7. REFERENCIAS

- Abad-Flores, J. (2020). *Aplicación de poliestireno expandido para mejorar la resistencia mecánica del adobe en el sitio Arqueológico de Pachacamac -Lima -2020* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- ABNT. (2008). *ABNT. NBR 8800. Proyecto de estructuras de acero y de estructuras mixtas de acero y concreto de edificios*.
- Ahmad, A., Pekrioglu-Balkis, A., & Kurtis-Onochie, K. (2022). The use of shredded plastic wastes in Alker production and its effect on compressive strength and shrinkage properties. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1563–1570. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.062>
- Araya-Letelier, G., Concha-Riedel, J., Antico, F., & Sandoval, C. (2019a). Experimental mechanical-damage assessment of earthen mixes reinforced with micro polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 198, 762–776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.261>
- Araya-Letelier, G., Duy, E., Reidel, Ú., Kunze, S., Burbano, C., & Saavedra, E. (2019b). Bloques de adobe reforzados transversalmente con plástico de botellas recicladas. *Recuperación de Estructuras: Primeras Jornadas Internacionales de Estudiantes Investigadores*, 168–180. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/337227755\\_BLOQUES\\_DE\\_ADOBE\\_REFORZADOS\\_TRANSVERSALMENTE\\_CON\\_PLASTICO\\_DE\\_BOTELLAS\\_RECICLADAS](https://www.researchgate.net/publication/337227755_BLOQUES_DE_ADOBE_REFORZADOS_TRANSVERSALMENTE_CON_PLASTICO_DE_BOTELLAS_RECICLADAS)
- Araya-Letelier, G., Gonzalez-Calderon, H., Kunze, S., Burbano-Garcia, C., Reidel, U., Sandoval, C., & Bas, F. (2020). Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures: Physical, mechanical, damage and durability performance assessment. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122806>
- Ascencios-Mostacero, S. (2020). *Propiedades de un adobe estructural con adición de cascarilla de arroz y plástico reciclado molido aplicado a viviendas climatizadas en Alto Perú, Ancash-2019* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *NBR 8492: 1984. Tijolo de Solo-cimento-Resistência e Absorção*.
- ASTM International. (2009). *ASTM D5102-09: Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*.
- ASTM International. (2015a). *ASTM C127-15: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- ASTM International. (2015b). *ASTM C349-15: Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)*.
- ASTM International. (2015c). *ASTM D695-15: Standard test method for compressive properties of rigid plastics*.
- ASTM International. (2016). *ASTM C109/C109M-16a: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*.
- ASTM International. (2017a). *ASTM D1633-17: Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*.
- ASTM International. (2017b). *ASTM D6913-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*.
- ASTM International. (2017c). *ASTM D7928-17: Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis*.
- Aznarán-Monzón, G. (2018). *Influencia del plástico reciclado en las propiedades físicas y mecánicas del adobe en el distrito de Santa – Ancash - 2018* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Bailón-Espinoza, J., & Huatuco-Cordova, E. (2021). *Uso de plástico PET como agregado en la fabricación de unidades de albañilería ecológica para la construcción de muros de cerramiento en el sector Cooperativa Santa Isabel, distrito de Huancayo, al 2021* [Tesis de Pregrado]. Universidad Continental.
- Balan, K., Roja, S., & Thasneem, A. (2021). Soil Stabilization with Rubber Latex and Human Hair Fibre– An Overview Paper. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 4(1), 1–5. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4693807>
- Barriola, J., & Ginoccio, F. (1983). *Experiencias con los Métodos de Campo de Clasificación de Suelos para la Construcción de Adobe*. PUCP.
- Barturen-Payano, G. (2020). *Incorporación de fibras de plástico PET reciclado para mejorar el adobe tradicional en el Pueblo Joven El Nazareno-Chiclayo-2020* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Bertelsen, I., Belmonte, L., Fischer, G., & Ottosen, L. (2021). Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials. *Construction and Building Materials*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122738>
- Binici, H., Aksogan, O., Bodur, M., Akca, E., & Kapur, S. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building Materials*, 21(4), 901–906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>
- Binici, H., Aksogan, O., & Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials*, 19(4), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.013>
- Binshad, A., Kavya, P., Sonij, P., Sreelal, C., & Shajeena, K. (2018). Study on stabilized earthen block reinforced with straw fibers. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(5), 1–4. Recuperado de: <https://www.irjet.net/archives/V5/i5/IRJET-515399.pdf>
- Brito-del Pino, J., Santamaría-Herrera, N., Macas-Peñarand, C., & Tasán-Cruz, D. (2021). Elaboración de adobe sostenible. *DAYA. Diseño, Arte y Arquitectura*, 11, 59–79. <https://doi.org/10.33324/daya.vi11.459>
- Burbano-Garcia, C., Araya-Letelier, G., Astroza, R., & Silva, Y. (2022). Adobe mixtures reinforced with fibrillated polypropylene fibers: Physical/mechanical/fracture/durability performance and its limits due to fiber clustering. *Construction and Building Materials*, 343, 128102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128102>
- Bureau of Indian Standards. (1980). *IS 2710: Methods of test for soil-cement blocks*.
- Bureau of Indian Standards. (1982). *IS 1725 (1982): Soil based blocks used in general building construction*.
- Bureau of Indian Standards. (1986). *IS 2720-13: Methods of test for soils, Part 13: Direct shear test*.
- Bureau of Indian Standards. (1992). *IS 3495. Methods of tests of burnt clay building bricks*.
- Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. *Procedia Technology*, 22, 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.077>
- Campos-Barboza, K., Gomez-Montalban, F., Montero-Nuñez, M., Pantoja-Guillen, F., & Pasco-Soto, J. (2019). *Diseño del Proceso de Producción de Ladrillos Basados en Plástico Reciclado* [Tesis de Pregrado]. Universidad de Piura
- Candenas-Tacac, J., Huancachoque-Leon, R., & Juanpedro-Cisneros, W. (2018). *Uso de fibras de polietileno tereftalato para el refuerzo del adobe tradicional* [Tesis de Pregrado]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Ccansaya-Saldaña, K., & Piña-Pereyra, D. (2021). *Diseño Sismorresistente de Vivienda de Albañilería Confinada Utilizando Bloques de Concreto con Polímeros Plásticos, Villa El Salvador – 2021* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Cerna-Livia, M., & Velásquez, C. (2021). *Estudios de propiedades mecánicas del adobe con adición de viruta de madera y tereftalato de polietileno en Aquia – Ancash 2021*. [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Chib, N., & Sharma, T. (2021). Experimental Investigation on Mechanical Properties of Compressed Soil Blocks Manufactured Using Waste Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 889(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/889/1/012012>
- Consoli, N., Montardo, J., Prietto, P., & Pasa, G. (2002). Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 462–472.



- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462))
- Cordell, L. (1996). *Ancient Pueblo Peoples (Exploring the ancient world)*. Smithsonian.
- Correa-Carlos, A., & Puican-Cumpa, P. (2021). *Caracterización física y mecánica del adobe incorporando fibras de cabuya y polímero reciclado PET en la ciudad de Ferreñafe, Lambayeque* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Cuitiño-Rosales, M., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Comparative analysis of thermal aspects and mechanical resistance of building materials and elements with earth. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(1), 138–151. <https://doi.org/10.14718/revarq.2020.2348>
- Deboucha, S., & Hashim, R. (2011). A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*, 6(3), 499–506. <https://doi.org/10.5897/SRE09.356>
- Di Marco-Morales, R., & León-Téllez, H. (2017). Ladrillos con adición de PET- una solución amigable para núcleos rurales del municipio del Socorro. *5to Simposio Internacional de Investigación En Ciencias Económicas 5to Simposio Internacional de Investigación En Ciencias Económicas, Administrativas y Contables - Sociedad y Desarrollo, Administrativas y Contables*, 1–42. <https://doi.org/10.18041/2027-1212/centauro.11.2016.2448>
- Donkor, P., & Obonyo, E. (2015). Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers. *Materials & Design*, 83, 813–819. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.017>
- Donkor, P., Obonyo, E., & Ferraro, C. (2021). Fiber Reinforced Compressed Earth Blocks: Evaluating Flexural Strength Characteristics Using Short Flexural Beams. *Materials*, 14(22), 6906. <https://doi.org/10.3390/ma14226906>
- Dueñas, B., Soto, W., & Carrera, E. (2021). Evaluation of the Thermic Efficiency of the Prototype at Scale of a Sustainable Housing that Uses Concrete with PET Fibers (CFP) and the Trombe System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1054(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1054/1/012006>
- El-Emam, M., & Al-Tamimi, A. (2022). Strength and Deformation Characteristics of Dune Sand Earth Blocks Reinforced with Natural and Polymeric Fibers. *Sustainability*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/su14084850>
- European Committee for Standardization. (2003). *UNE-EN 771-1:2003: Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units*. European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 772-1:2011: Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength*. European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2016). *EN 1052-2:2016: Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the tensile properties - Part 2: Wide-width tensile test*. European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 1015-11:2019. Test methods for mortars for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar*. European Committee for Standardization.
- Farias-Solano, M. (2019). *Influencia del porcentaje de polietileno tereftalato en las propiedades físicas y mecánicas del bloque de concreto - 2018* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & Bradley, F. (2013). Ultrasonic, Molecular and Mechanical Testing Diagnostics in Natural Fibre Reinforced, Polymer-Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Polymer Science*, 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/130582>
- Gama-Castro, J., Cruz, T., Pi-Puig, T., Alcalá-Martínez, R., Cabadas-Báez, H., Jasso-Castañeda, C., Díaz-Ortega, J., Sánchez-Pérez, S., López-Aguilar, F., & Vilanova, R. (2012). Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 177–188. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n2a3>
- Gandia, R., Gomes, F., Corrêa, A., Rodrigues, M., & Mendes, R. (2019). Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials*, 222, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>
- Goli, V., Mohammad, A., & Singh, D. (2020). Application of Municipal Plastic Waste as a Manmade Neo-construction Material: Issues & Wayforward. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105008>
- Gordillo-Monteza, C. (2020). *Evaluación de la resistencia a compresión de ladrillos ecológicos con aplicación de tereftalato de polietileno, Moyobamba, 2020* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Goutsaya, J., Ntamack, G., Kenmeugne, B., & Charif-d'Ouazzane, S. (2021). Mechanical characteristics of compressed earth blocks, compressed stabilized earth blocks and stabilized adobe bricks with cement in the town of Ngaoundere - Cameroon. *Journal of Building Materials and Structures*, 8(2), 139–159. <https://doi.org/10.34118/jbms.v8i2.1441>
- Guio-Pérez, M. (2019). *Comportamiento mecánico de bloques comprimidos de suelo cemento al 6% con fibras sintéticas de PET* [Tesis de Pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Gutiérrez-Villalobos, J., Moreno-Martínez, J., Catalán-Quiroz, P., & Galván-Chávez, A. (2021). Characterization of adobe bricks used in developing countries: Mexico as a case of study. *Journal of Architecture and Design*, 5(13), 1–12. <https://doi.org/10.35429/JAD.2021.13.5.1.12>
- Hejazi, S., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Illampas, R., Ioannou, I., & Charmpis, D. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction*

- and *Building Materials*, 53, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103>
- Inga-Castro, A. (2019). *Diseño de un adobe con poliestireno expandido reciclado para una vivienda climatizada en la zona rural de Piruruyoc, Huaraz - Ancash, 2019* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *NTC 3495: Bloques y ladrillos de concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 4205. Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
- Instituto Nacional de Calidad. (2003). *NTP 330.613: Agua. Evaluación de la calidad*.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2005). *NTP 339.034: Resistencia a la compresión*. Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Instituto Nacional de Normalización. (2008). *NCh 851:2008: Muros de contención de tierra armada*. Instituto Nacional de Normalización.
- Islam, M., Islam, K., Shahjalal, M., Khatun, E., Islam, S., & Razzaque, A. (2022). Influence of different types of fibers on the mechanical properties of recycled waste aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 337, 127577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127577>
- Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020). Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review. *Construction and Building Materials*, 254, 119346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119346>
- Jayaram, M., Kastro-Kiran, V., & Karthik, T. (2021). Characteristics of Bricks with Virgin Plastic and Bottom Ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1057, 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012080>
- Kasinikota, P., & Tripura, D. (2021). Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. *Construction and Building Materials*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520>
- Khalid, F., Saaidin, S., Shahidan, S., Othman, N., & Guntor, N. (2020). Strength of Concrete Containing Synthetic Wire Waste as Fiber Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 713(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012003>
- Kumar, R., Kumar, M., Kumar, I., & Srivastava, D. (2021). A review on utilization of plastic waste materials in bricks manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6775–6780. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.337>
- Lozano-Rios, F., & Valle-Fernández, H. (2020). *Diseño de un bloque de adobe, utilizando fibras de botellas plásticas, para reducir el costo y mejorar la resistencia a la compresión, Lamas 2020* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Lucas, A., & Harris, J. (2011). *Ancient Egyptian Materials and Industries* (4th ed.). Dover Publications.
- Márquez-Domínguez, S., Mejía-Sánchez, E., & Renzano A. (2018). Soft Pre-stressed PET profiles as reinforcing fibers in structural elements made of concrete. *DYNA*, 85(206), 162–170. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.71805>
- Menon, J., & Ravikumar, M. (2019). Evaluation of Laterite Soil Stabilized using Polymer Sack Fibers. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(6), 682–685. [Recuperado de: https://www.ijitee.org/portfolio-item/e2948038519/](https://www.ijitee.org/portfolio-item/e2948038519/)
- Meza-de Luna, A., Gurbir, K., Preciado-Martínez, H., & Gutiérrez-López, I. (2021). Desempeño a Flexión del Concreto Reforzado con Fibras Plásticas Reciclad. *Conciencia Tecnológica*, 61. [Recuperado de: https://www.redalyc.org/comocitar.oi?id=94467989001](https://www.redalyc.org/comocitar.oi?id=94467989001)
- Ming, Y., Chen, P., Li, L., Gan, G., & Pan, G. (2021). A Comprehensive Review on the Utilization of Recycled Waste Fibers in Cement-Based Composites. *Materials*, 14(13), 3643. <https://doi.org/10.3390/ma14133643>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *Norma Técnica E.080. Diseño y Construcción con Tierra Reforzada*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2014). *Norma Técnica E.070: Albañilería*.
- Mir, B., & Shah, R. (2019). *How Stiffness of Reinforcement Affects the Type of Major Reinforcement Force Developed at Various Orientations in Reinforced Sand?* (pp. 137–151). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01944-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01944-0_11)
- Muntohar, A., Widiarti, A., Hartono, E., & Diana, W. (2013). Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1260–1270. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659)
- Nasrollahzadeh, K., & Zare, M. (2020). Experimental investigation on axially loaded adobe masonry columns confined by polymeric straps. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119895>
- Noa-Huaman, M., & Ordoñez-Claros, D. (2022). *Adición de Fibras PET en el adobe para aumentar la capacidad resistente a la compresión, reducir la densidad, el porcentaje de absorción de agua y la conductividad térmica en las viviendas de la zona rural de Ayacucho-Perú* [Tesis de Pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Núñez-Aldás, G., López-Arboleda, A., Chérrez-Gavilanes, D., & Guevara-Robalino, J. (2021). Adición de botellas plásticas pet en la elaboración de bloques de adobe para viviendas unifamiliares y su efecto en la variación de temperatura y acondicionamiento acústico en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua. *Ciencia Digital*, 5(1), 197–218. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v5i1.1536>
- Oliveira-Metzker, S., Freire-Sabino, T., Farinassi-Mendes, J., Cornélio-Ribeiro, A., & Farinassi-Mendes, R. (2022). Soil-Cement bricks development using polymeric waste. *Environmental Science and Pollution Research Volume*,

- 29, 21034–21048. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-451591/v1>
- Onochie, K., & Balkis, A. (2021). Polypropylene fiber reinforced Alker as a structurally stable and sustainable building material. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123600>
- Paschoalin-Filho, J., João, H., & Guerner-Dias, A. (2016). Evaluation of compressive strength and water absorption of soilcement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. *Acta Scientiarum*, 38(2), 163–171. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i2.28458>
- Paucar-Sevillano, C. (2018). *Diseño de un adobe con adición de poliestireno para la construcción de viviendas climatizadas en la zona rural del distrito de Caraz, Ancash - 2018* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Paul, S., Islam, M., & Elahi, T. (2022). Comparative effectiveness of fibers in enhancing engineering properties of Earth as a building Material: A review. *Construction and Building Materials*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127366>
- Peña-Estrella, E., & Niño-Santos, J. (2019). *Análisis del comportamiento de muros en adobe reforzados con fleje plástico en polipropileno y tiras plásticas reciclables de botellas de PET* [Tesis de pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Pérez-Collantes, D. (2021). *Influencia del plástico PET en las propiedades de ladrillos de concreto ecológicos para viviendas unifamiliares, Carabayllo – 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Pérez-Pérez, L. & Zamora-Fernández, H. (2020). *Diseño de bloques de concreto modificados con fibras de plástico reciclado para la reducción de cargas en edificaciones, Tarapoto, 2020* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Piñeros-Moreno, M., & Herrera-Muriel, R. (2018). *Proyecto de factibilidad económica para la fabricación de bloques con agregados de plástico reciclado (PET), aplicados en la construcción de vivienda* [Tesis de Pregrado]. Universidad Católica de Colombia.
- Quispe-Crisis, N. (2017). *Evaluación del esfuerzo admisible del adobe estabilizado con fibras de pet triturado en la zona de mollepatá provincia de Huamanga, Departamento de Ayacucho – 2016* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional De San Cristóbal De Huamanga.
- Rabello, L., & da Conceição-Ribeiro, R. (2021). A novel vermiculite/ vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production. *Composites Part B: Engineering*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109035>
- Radwan, M., Lee, F., Woon, Y., Yew, M., Mo, K., & Wai, S. (2021). A Study of the Strength Performance of Peat Soil: A Modified Cement-Based Stabilization Agent Using Fly Ash and Polypropylene Fiber. *Polymers*, 13(23), 4059. <https://doi.org/10.3390/polym13234059>
- Ramakrishnan, S., Loganayagan, S., Kowshika, G., Ramprakash, C., & Aruneshwaran, M. (2021). Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6493–6499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.377>
- Robalino-Sánchez, E. (2019). *La adición de botellas plásticas PET en la elaboración de bloques de adobe para viviendas unifamiliares y su efecto en la variación de temperatura y acondicionamiento acústico en el cantón Ambato provincia de Tungurahua* [Tesis de Pregrado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Ruiz, G., Zhang, X., Edris, W., Cañas, I., & Garijo, L. (2018). A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 176, 566–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.077>
- Safiuddin, M., Jumaat, Z., Salam, M., Islam, M., & Hashim, R. (2010). Utilization of solid wastes in construction materials. *International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1952–1963. Recuperado de: <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/1B5823B32355>
- Salaou, N., Thuo, J., Kabubo, C., & Gariy, Z. (2021). Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Laterite Masonry Bricks. *Civil Engineering and Architecture*, 9(7), 2178–2186. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090707>
- Salazar-Saucedo, J., & Tejada-Escobedo, Y. (2021). *Análisis comparativo de la resistencia a la compresión de adobe estabilizado bajo los criterios de la Norma E080, Trujillo 2021* [Tesis de Pregrado]. Universidad Privada del Norte.
- Salih, M., Osofero, A., & Imbabi, M. (2020a). Constitutive models for fibre reinforced soil bricks. *Construction and Building Materials*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117806>
- Salih, M., Osofero, A., & Imbabi, M. (2020b). Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(4), 839–854. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0630-7>
- Sandoval-Saucedo, J., & Guzmán-Hasegawa, R. (2019). *Propuesta de elaboración y diseño de bloques de concreto simple y pet reciclado para muros de mampostería en la ciudad de Piura* [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Serrano, S., Barreneche, C., & Cabeza, L. (2016). Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation. *Construction and Building Materials*, 108, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.044>
- Sharma, S., Sudhakara, P., Misra, S., & Singh, J. (2021). Critical review on the Solid-wastes issue: Generation, Composition, Disposal and their recycling potential for various applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 1804(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1804/1/012147>
- Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., & Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. *Informes de La Construcción*, 67(539), e092. <https://doi.org/10.3989/ic.13.141>
- Subramania-Prasad, C. (2013). *A Study on the Utilization of Plastic Wastes in Stabilized Masonry Blocks* [Doctoral Thesis]. Cochin University of Science and Technology.

- Subramania-Prasad, C., Abraham, B., & Kunhanandan-Nambiar, E. (2014). Sorption characteristics of stabilised soil blocks embedded with waste plastic fibres. *Construction and Building Materials*, 63, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.042>
- Subramania-Prasad, C., Kunhanandan-Nambiar, E., & Mathews-Abraham, B. (2011). Plastic Fibre Reinforced Soil Blocks as a Sustainable Building Material. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 1(5). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/258650289\\_Plastic\\_Fibre\\_Reinforced\\_Soil\\_Blocks\\_as\\_a\\_Sustainable\\_Building\\_Material](https://www.researchgate.net/publication/258650289_Plastic_Fibre_Reinforced_Soil_Blocks_as_a_Sustainable_Building_Material)
- Sujatha, E., & Selsia-Devi, S. (2018). Reinforced soil blocks: Viable option for low cost building units. *Construction and Building Materials*, 189, 1124–1133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.077>
- Tavares, G., & Magalhães, M. (2019). Effect Of Recycled Pet Fibers Inclusion On The Shrinkage Of Adobe Brick. *3 Rd International Conference on Bio-Based Building Materials*, 37(2), 545–550. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.79>
- Thakare, A., Singh, A., Gupta, V., Siddique, S., & Chaudhary, S. (2021). Sustainable development of self-compacting cementitious mixes using waste originated fibers: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105250>
- UNE. (2018). *UNE-EN 196-1:2018. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias*.
- Vázquez-Greciano, A. (2018). *Refuerzo estructural con PET reutilizado. Aplicación en adobe* [Tesis de Pregrado]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- Vignesh, N., Arunachelam, N., Mahendran, K., & Dinesh Kumar, B. (2021). A Study on Polymeric Fibre Reinforced Stabilized Mud Blocks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1026(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1026/1/012010>
- Wang, S., Chen, F., Xue, Q., & Zhang, P. (2020). Splitting Tensile Strength of Cement Soil Reinforced with Basalt Fibers. *Materials*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/ma13143110>
- Yazici, M. F., & Keskin, N. (2021). A Review on Soil Reinforcement Technology by Using Natural and Synthetic Fibers. *Erzincan Üniversitesi Journal of Science and Technology*, 14(2), 631–663. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339>
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., & Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 22(3), 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>

## BIOGRAFÍAS



**Adán, Jiménez-Montoya**, Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en la División de Ingeniería Civil del Tecnológico Nacional de México- TES San

Felipe del Progreso. Su área de investigación es el diseño mecánico enfocado al desarrollo de materiales alternativos de construcción y fuentes alternas de energía.



**Juan Benito, Pascual-Francisco**, Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica por la Sección de Posgrados del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente es profesor investigador de tiempo completo adscrito al Departamento de Mecatrónica de la Universidad Politécnica de

Pachuca. Su área de investigación es el diseño mecánico, la mecánica experimental y la aplicación de técnicas ópticas para la caracterización de propiedades mecánicas de materiales de ingeniería.



**Gabriela, Sánchez-Ruiz**, Ingeniero Industrial por parte del Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán y Maestra en Administración por la Universidad de Ixtlahuaca, es investigadora por el Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso, sus áreas de interés

son el desarrollo de materiales y técnicas sustentables en la construcción, innovación en materiales con residuos.



**Jael Kaleb, Novelo-Ramos**, Estudiante de Ingeniería Civil del Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso y miembro del capítulo estudiantil de la Sociedad Mexicana de Ingeniería en Geotecnia. Sus áreas de interés son la mecánica de suelos y geotecnia.



**Ana Laura, Matías Molina,** Estudiante de Ingeniería Civil del Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso y miembro del capítulo estudiantil de la Sociedad Mexicana de Ingeniería en Geotecnia. Sus áreas de interés son la mecánica de suelos y geotecnia.



**María Guadalupe, Ríos-Ledezma,** Estudiante de Ingeniería Civil del Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso. Sus principales áreas de interés son: materiales y procesos constructivos, Mecánica de materiales, y Tecnología del concreto.

## INDEXACIONES

Scopus®

SciELO

redalyc.org UAEM

latindex  
catálogo  
2.0

DOAJ  
DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

REDIB  
Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico



REVISTA  
POLITÉCNICA

MIAR  
Matriz de Información para el  
Análisis de Revistas

CiteFactor  
Academic Scientific Journals

BASE  
Bielefeld Academic Search Engine

Google  
Scholar

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)

Academic  
Resource  
Index  
ResearchBib

INDEX COPERNICUS  
INTERNATIONAL

Crossref  
doi  
DIGITAL  
OBJECT  
IDENTIFIER



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990  
Volumen 53, Nro. 2, Mayo · Julio 2024







ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)