

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

MEJORA DE LA RESISTENCIA DEL PAVIMENTO ARTICULADO ECOLÓGICO CON ÓXIDO DE CALCIO Y VIDRIO RECICLADO TRITURADO

IMPROVING THE STRENGTH OF ECO-FRIENDLY
INTERLOCKING PAVING STONES WITH CALCIUM OXIDE
AND CRUSHED RECYCLED GLASS

Adrian-Antonio Aching-Santillan
Universidad particular Cesar Vallejo, Perú

Manuel Angel Neil Esteves Diaz
Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.22032

Mejora de la Resistencia del Pavimento Articulado Ecológico con Óxido de Calcio y Vidrio Reciclado Triturado

Adrian Antonio Aching Santillan¹

aaching@ucvvirtual.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0000-9247-4809>

Universidad particular Cesar Vallejo
Peru

Manuel Angel Neil Esteves Diaz

aesteves@unaaa.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0001-8775-8716>

Universidad Nacional Autónoma
de Alto Amazonas
Peru

RESUMEN

Los pavimentos articulados están compuestos principalmente por concreto, el objetivo de la investigación es encontrar la proporción optima de vidrio reciclado y óxido de calcio reemplazando el agregado fino en el concreto, mejorando las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, flexión y tracción. Se realizo 45 ensayos a la compresión con NTP 399.604, 15 ensayos de resistencia a la flexión con la NTP 399.611 y 15 ensayos a la tracción con UNE 1338:2003. La muestra experimental 04 con 8% de óxido de calcio y 7% de vidrio triturado obtuvo una resistencia a la compresión superior a la muestra patron. La muestra experimental 01 con 4% de óxido de calcio y 7% de vidrio triturado obtuvo una resistencia a la flexión y tracción superior a la muestra patron. No hay la proporción de óxido de calcio y vidrio triturado que supere a la muestra patron en los 3 ensayos en simultaneo.

Palabras clave: hormigón, cal, Vidrio, ensayo

¹ Autor principal.

Correspondencia: aaching@ucvvirtual.edu.pe

Improving the Strength of Eco-Friendly Interlocking Paving Stones with Calcium Oxide and Crushed Recycled Glass

ABSTRACT

Interlocking paving stones are mainly composed of concrete. The aim of the research is to find the optimal proportion of recycled glass and calcium oxide to replace the fine aggregate in the concrete, improving the mechanical properties of compressive, flexural, and tensile strength. Forty-five compression tests were performed in accordance with NTP 399.604, 15 flexural strength tests in accordance with NTP 399.611, and 15 tensile strength tests in accordance with UNE 1338:2003. Experimental sample 04 with 8% calcium oxide and 7% crushed glass obtained a compressive strength higher than the standard sample. Experimental sample 01 with 4% calcium oxide and 7% crushed glass obtained a flexural and tensile strength higher than the standard sample. There is no proportion of calcium oxide and crushed glass that exceeds the standard sample in the three simultaneous tests.

Keywords: concrete, lime, glass, testing

*Artículo recibido 30 noviembre 2025
Aceptado para publicación: 30 diciembre 2025*



INTRODUCCIÓN

La investigación sobre la resistencia del pavimento articulado ecológico con la suplementación de óxido de calcio (CaO) y vidrio reciclado triturado viene a enriquecer una problemática que cada día se relaciona más con la infraestructura urbana, como el de la mejora de los pavimentos duraderos y sostenibles. El uso de materiales reciclados en la construcción de pavimentos no busca sólo la mejora de la resistencia mecánica, sino que busca también la reducción del impacto de la producción de estos materiales y su retorno como residuos. En ese contexto, el trabajo busca la identificación de las texturas que permitan mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto utilizado en la construcción de adoquines.

El problema principal inicia en la mejora de la resistencia y durabilidad de los pavimentos articulados en las zonas urbanas, tal y como demuestra el distrito de Ate, donde la degradación de los adoquines viene a incrementar los costos de mantenimiento y poner en peligro la seguridad vial. A pesar de que el uso de materiales reciclados ha mejorado considerablemente no se puede afirmar que la dosificación de óxido de calcio y vidrio reciclado se haya resuelto, y aunque son considerados materiales activadores del concreto, necesarios de su evaluación para definir qué proporción es la mejor para la optimización de la resistencia a la compresión, esfuerzos a la flexión, tracción y la durabilidad del pavimento articulado ecológico.

La importancia de la investigación: el estudio puede contribuir a crear una solución económica y ecológica para la mejora de la infraestructura urbana, a partir de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, que promueven las ciudades sostenibles, la gestión de los recursos y la actuación frente al cambio climático. Así que la investigación en cuestión ayuda a que se desarrolle nuevas tecnologías dentro de la ingeniería civil y que se puedan trasladar a otras partes del país mejorando así la sostenibilidad de los proyectos de pavimentación.

El marco teórico en el cual se basa esta investigación es el que deviene a partir de investigaciones anteriores, donde ya se ha puesto en marcha el uso de materiales reciclados, en especial vidrio tratado, para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Investigaciones de Zaremotekhases et al. (2022); y Şengül et al. (2022) evidencian que el uso de cal y vidrio reciclado mejora la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión del concreto, si bien las diferentes investigaciones han



considerado diferentes proporciones y tipos de materiales. La investigación que aquí se presenta utilizará dichas dosificaciones con la intención de optimizar el rendimiento del pavimento.

En cuanto a la metodología, el presente trabajo se desarrolla a partir de un diseño experimental de enfoque cuantitativo, aplicando un procedimiento de análisis hipotético-deductivo con el fin de comprobar la forma en la que la combinación de CaO y el vidrio reciclado actúa de forma positiva sobre las propiedades físico-mecánicas del pavimento articulado ecológico. Se proponen tres objetivos específicos en relación a la mejora de la resistencia a la compresión, la tracción y la flexión del concreto que son evaluados de acuerdo a ensayos de laboratorio. Se plantea una hipótesis general que postula que la inclusión de estos materiales reciclados tendrá un efecto positivo sobre la resistencia del pavimento, la cual se verifica mediante los ensayos experimentales.

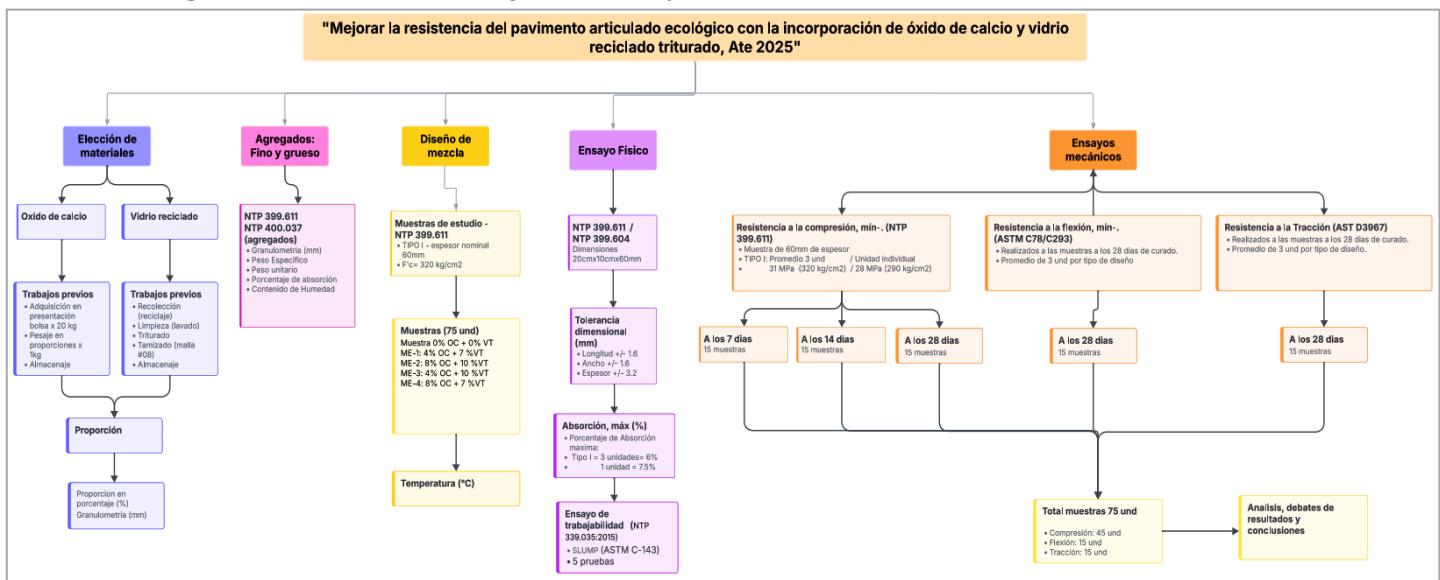
El presente trabajo está contextualizado en una búsqueda de soluciones sostenibles y responsables para el desarrollo urbano, que ilustra el uso de residuos reciclados como una forma de disminuir la huella ambiental en las actividades constructivas y que contribuye al cumplimiento de los ODS.

METODOLOGÍA

El método de investigación que se aplicará en este trabajo será de tipo cuantitativa, pues se quiere obtener datos numéricos y examinar los efectos de la adición de CaO y la adición de VRT sobre las propiedades mecánicas del pavimento articulado ecológico. El diseño del estudio es de tipo experimental, puesto que se va a manipular las variables independientes (CaO y VRT) afín de observar el efecto que tienen sobre las propiedades dependientes del concreto, concretamente de la resistencia a la compresión, a la flexión, y a la tracción. El diseño experimental será de tipo comparativo, dado que se ensayarán diferentes proporciones de los materiales para examinar su efecto sobre el rendimiento del pavimento articulado. Así mismo el tipo de investigación es aplicativa, dado que se busca resolver un problema concreto de la infraestructura urbana, específicamente en la mejora de la resistencia de pavimentos articulados en zonas urbanas con alta carga vehicular, como el distrito de Ate, en Lima Metropolitana. A través de este estudio, se pretende optimizar el uso de materiales reciclados (CaO y VRT) para la construcción de pavimentos, lo que representa una solución práctica y útil para la mejora de la infraestructura vial.



Figura 01.- Estructura de desglose de trabajo EDT.



Fuente: Elaboración propia

Diseño de la investigación

El diseño utilizado es experimental, ya que se manipulan las variables independientes (proporciones de CaO y VRT) para observar sus efectos sobre la resistencia mecánica del concreto en pruebas de compresión, flexión y tracción. Este diseño es transversal, ya que se realizará un análisis en un periodo determinado para evaluar las propiedades del concreto en función de las dosificaciones aplicadas, sin realizar un seguimiento a largo plazo.

Población y muestra

La población de estudio está constituida por los adoquines de concreto que se emplean en pavimentos articulados ecológicos. La muestra fue seleccionada de manera no probabilística, basándose en la conveniencia y las características del objeto de estudio. Se utilizaron 75 unidades de adoquines como muestra experimental, divididos en 5 grupos que corresponden a diferentes combinaciones de CaO y VRT, con 15 unidades por grupo. Las combinaciones son las siguientes:

- Muestra control: 0% CaO + 0% VRT
- ME-1: 4% CaO + 7% VRT
- ME-2: 8% CaO + 10% VRT
- ME-3: 4% CaO + 10% VRT
- ME-4: 8% CaO + 7% VRT



Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se basó en pruebas de laboratorio controladas, consistentes en ensayos de resistencia a la compresión, flexión y tracción del concreto de los adoquines. Cada prueba se realizó conforme a estándares normativos reconocidos: para compresión se empleó prensa hidráulica siguiendo normas técnicas establecidas; para flexión y tracción se utilizaron equipos especializados adecuados a las normativas vigentes en el ámbito del concreto. Los resultados se registraron mediante fichas estandarizadas de laboratorio, en las cuales se consignaron las características de las muestras, condiciones de curado, proporciones de materiales y valores obtenidos en cada ensayo.

La técnica principal utilizada para la recolección de datos fue la observación experimental, debido a que se realizaron pruebas físicas y mecánicas en los adoquines elaborados, siguiendo normas internacionales para cada tipo de ensayo. Las pruebas se enfocaron en medir la resistencia a la compresión (según la NTP 399.611), a la flexión (según el NTP 399.611) y a la tracción (según el UNE 1338:2003).

Además, se utilizó un instrumento de recolección de datos estructurado, como las fichas de registro de las pruebas de laboratorio, en las cuales se anotaron los resultados de cada ensayo, así como las condiciones de las muestras. Para la prueba de compresión, se utilizó una prensa hidráulica, mientras que para las pruebas de flexión y tracción se emplearon equipos especializados de acuerdo con las normativas aplicadas.

Tabla 01. Normas para pruebas a llevar a cabo

Reglamento vigente	
Pruebas	Reglamentos
Resistencia a la Compresión, Min	NTP 399.611; 399.604
Muestreo y método de ensayo	NTP 399.604
Cementos	NTP 334.009, 334.009, NTP 334.082 y NTP 334.090
Agua de Mezcla	NPT 339.088
Agregados	NTP 400.037
Resistencia a la tracción indirecta en adoquín de concreto	UNE 1338:2003
Flexión en adoquín de concreto	NTP 399.611
Pavimentos urbanos	NTP CE 0.10

Fuente: Elaboración propia



Tabla 02.- Adoquines – Requisitos

Tipo	Uso
I	Adoquines para pavimentos de uso del peatón. ($F'c = 320 \text{ kg/cm}^2$)
II	Adoquines para pavimentos de tránsito de vehículos ligeros.
III	Adoquines para tránsito de vehículos pesados, patios para industrias y/o contenedores.

Fuente: Norma Técnica Peruana 399.611

Tabla 03.- Especificaciones y medidas

Ensayo	Reglamentos
Tipo	1
Dimensiones	20 cm x 10 cm x 60 mm
Norma de referencia	NTP 399.611
Norma de ensayo	NTP 399.604

Fuente: Norma Técnica Peruana 399.611 y 399.604

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron en el estudio únicamente aquellos adoquines elaborados con las dosificaciones previstas de CaO y VRT, correctamente curados y sin defectos visibles. Se excluyeron las unidades que presentaran fisuras, deformaciones o imperfecciones, así como aquellas que no cumplieran con el tiempo de curado establecido o no respondieran a las especificaciones del diseño experimental.

Criterios de inclusión

Pavimentos articulados de concreto diseñados para ser utilizados como adoquines ecológicos, adoquines elaborados con la incorporación de las proporciones de CaO y VRT especificadas en el estudio, muestras que hayan cumplido con las normas para ensayos a la compresión, tracción y flexión según las normativas mencionadas.

Criterios de exclusión

Muestras que presenten defectos visibles, como fisuras o imperfecciones, que puedan afectar los resultados de las pruebas, muestras que no hayan sido correctamente curadas o que no hayan cumplido con los tiempos de curado establecidos, muestras que no cumplan con los parámetros definidos para la investigación.



Figura 02.Vidrio triturado pasante la malla N°8.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 03.Oxido de calcio.



Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones éticas

Este estudio se ajustó a los principios éticos que rigen la investigación en el ámbito de la ingeniería civil. Se garantizó la transparencia en los procedimientos y en la recolección de datos, así como el manejo adecuado de los materiales utilizados en las pruebas, asegurando que no se presentaran riesgos para los investigadores ni para las comunidades involucradas en la investigación. El estudio no implica la manipulación directa de personas o animales, por lo que las consideraciones éticas fueron principalmente relacionadas con el manejo responsable de los recursos materiales y la integridad en el reporte de los resultados.

Limitaciones del estudio

Las principales limitaciones del estudio incluyen la variabilidad en las condiciones ambientales durante los ensayos, que podrían haber influido en los resultados de las pruebas de resistencia. Además, al ser un estudio experimental limitado a un número específico de muestras, los resultados obtenidos podrían no ser totalmente extrapolables a otras ubicaciones o condiciones de uso. Otra limitación se refiere a la disponibilidad de recursos para realizar pruebas adicionales a largo plazo, como la evaluación de la durabilidad del pavimento a lo largo de varios años.

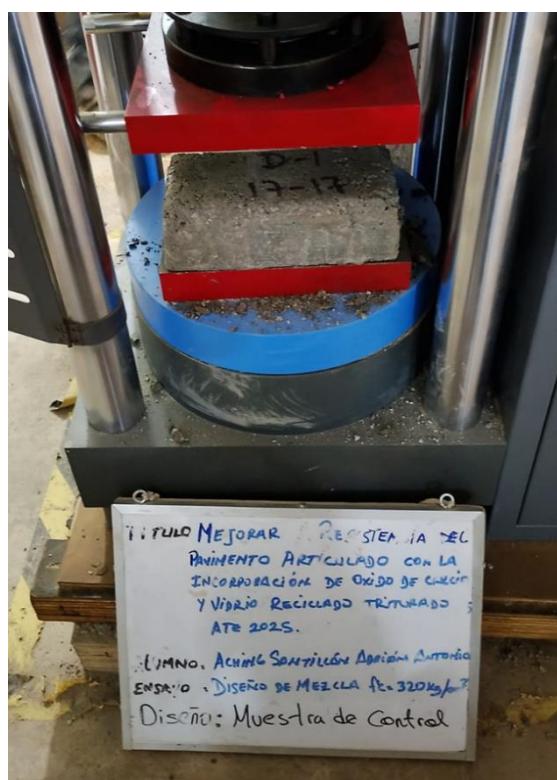
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, tracción y flexión del pavimento articulado ecológico, con diferentes combinaciones de óxido de calcio (CaO) y vidrio reciclado triturado (VRT),

han demostrado un comportamiento significativo en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto. Los adoquines fabricados con las combinaciones más altas de CaO y VRT (específicamente las mezclas ME-4 y ME-1) presentaron incrementos notables en la resistencia en comparación con la muestra control.

Resistencia a la compresión: La muestra control, que no contenía CaO ni VRT, mostró una resistencia promedio a la compresión a los 28 días de 408.00 kg/cm^2 . En las mezclas experimentales, la muestra experimental con 8% de CaO y 7% de VRT (ME-4) alcanzo una resistencia promedio de 457.67 kg/cm^2 , mientras que las muestras con 4% de CaO y 7% de VRT (ME-1) alcanzo un promedio de 392.67 kg/cm^2 , la muestra experimental con 8% OC y 10 VRT (ME-2) y la muestra experimental con 4% CaO y 10% VTR (ME-3) alcanzo 413.30 kg/cm^2 . Estos resultados reflejan el incremento de la muestra experimental N°04 aproximadamente el 12.17% de resistencia en comparación con el control.

Figura 04 Ensayo a la compresión Fuente:



Elaboración propia.

Figura 05. Comportamiento de la muestra tras el ensayo a flexión de la muestra patrón



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 041. Resultados de ensayos a la compresión a los 7 días

Muestra	Pruebas a la compresión, diseño F'c 320 kg/cm2					
	Días	Muestra control - 0% OC + 0% VT	ME-1: 4% OC + 7 %VT	ME-2: 8% OC + 10 %VT	ME-3: 4% OC + 10 %VT	ME-4: 8% OC + 7 %VT
1	7	247	327	316	234	353
2	7	254	277	332	264	352
3	7	241	282	334	272	335

Fuente: Elaboración propia

Tabla 052. Resultados de ensayos a la compresión a los 14 días

Muestra	Pruebas a la compresión, diseño F'c 320 kg/cm2					
	Días	Muestra control - 0% OC + 0% VT	ME-1: 4% OC + 7 %VT	ME-2: 8% OC + 10 %VT	ME-3: 4% OC + 10 %VT	ME-4: 8% OC + 7 %VT
4	14	284	383	349	357	397
5	14	299	355	346	353	379
6	14	311	379	363	340	387

Fuente: Elaboración propia

Tabla 063.- Resultados de ensayos a la compresión a los 28 días

Muestra	Pruebas a la compresión, diseño F'c 320 kg/cm2					
	Días	Muestra control - 0% OC + 0% VT	ME-1: 4% OC + 7 %VT	ME-2: 8% OC + 10 %VT	ME-3: 4% OC + 10 %VT	ME-4: 8% OC + 7 %VT
7	28	417	385	396	400	456
8	28	414	382	453	396	454
9	28	393	411	391	426	463

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión: En las pruebas de compresión, los adoquines con 8% de CaO y 7% de VRT (ME-4) mostraron el mejor rendimiento, con una resistencia de 457.67 kg/cm2, lo que representa un aumento significativo en comparación con el adoquín de control, que alcanzó solo 408.00 kg/cm2 a los 28 días de curado de las muestras. Esta mejora refleja un incremento de 12.17%.

Se adjunta las medias estadísticas a los 7, 14 y 28 días de curado de las muestras.



Tabla 07. MEDIA ESTADISTICA a 7 días de Resistencia a la compresión

Medias				
Diseño de mezcla	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
ME-1: 4% OC + 7 %VT	3	295.3	27.5	(273.8; 316.9)
ME-2: 8% OC + 10 %VT	3	327.33	9.87	(305.79; 348.87)
ME-3: 4% OC + 10 %VT	3	256.7	20.0	(235.1; 278.2)
ME-4: 8% OC + 7 %VT	3	346.67	10.12	(325.13; 368.21)
Muestra control - 0% OC + 0% VT	3	247.33	6.51	(225.79; 268.87)
<i>Desv.Est. agrupada = 16.7432</i>				

Tabla 08. Media Estadistica a 14 días de Resistencia a la compresión

Medias				
Diseño de mezcla	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
ME-1: 4% OC + 7 %VT	3	372.33	15.14	(357.61; 387.06)
ME-2: 8% OC + 10 %VT	3	352.67	9.07	(337.94; 367.39)
ME-3: 4% OC + 10 %VT	3	350.00	8.89	(335.28; 364.72)
ME-4: 8% OC + 7 %VT	3	387.67	9.02	(372.94; 402.39)
Muestra control - 0% OC + 0% VT	3	298.00	13.53	(283.28; 312.72)
<i>Desv.Est. agrupada = 11.4455</i>				

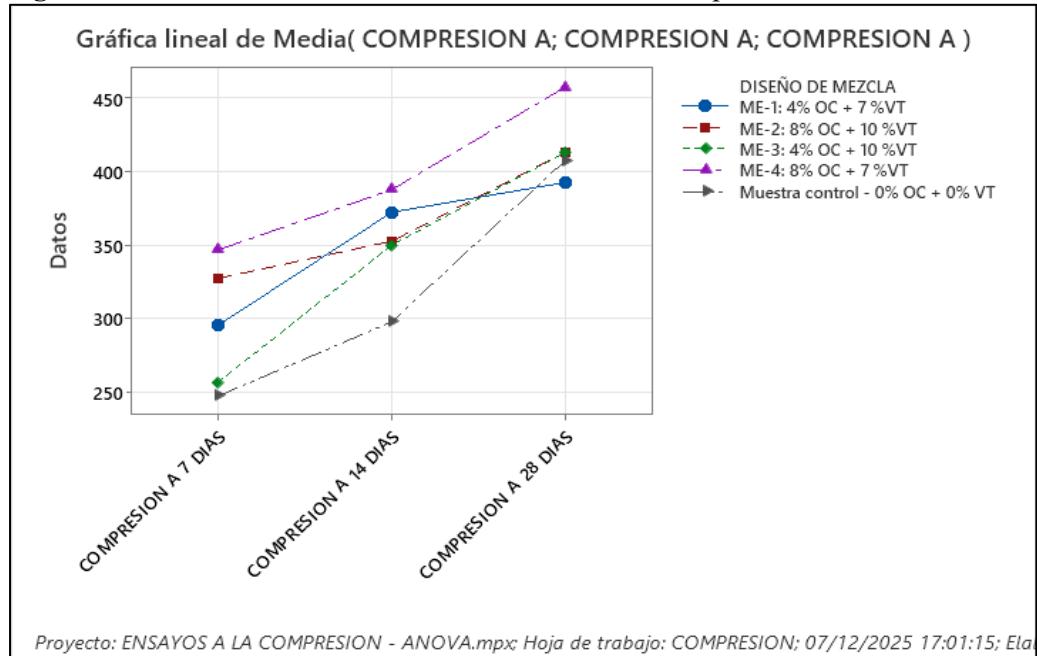
Tabla 094. Media Estadistica a 28 días de Resistencia a la compresión

Medias				
Diseño de mezcla	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
ME-1: 4% OC + 7 %VT	3	392.67	15.95	(362.11; 423.22)
ME-2: 8% OC + 10 %VT	3	413.3	34.4	(382.8; 443.9)
ME-3: 4% OC + 10 %VT	3	413.3	34.4	(382.8; 443.9)
ME-4: 8% OC + 7 %VT	3	457.67	4.73	(427.11; 488.22)
Muestra control - 0% OC + 0% VT	3	408.00	13.08	(377.45; 438.55)
<i>Desv.Est. agrupada = 23.7501</i>				

Se compara la evolucion gráfica de la resistencia a los 7, 14 y 28 días, de la muestra control y las 4 muestras experimentales.

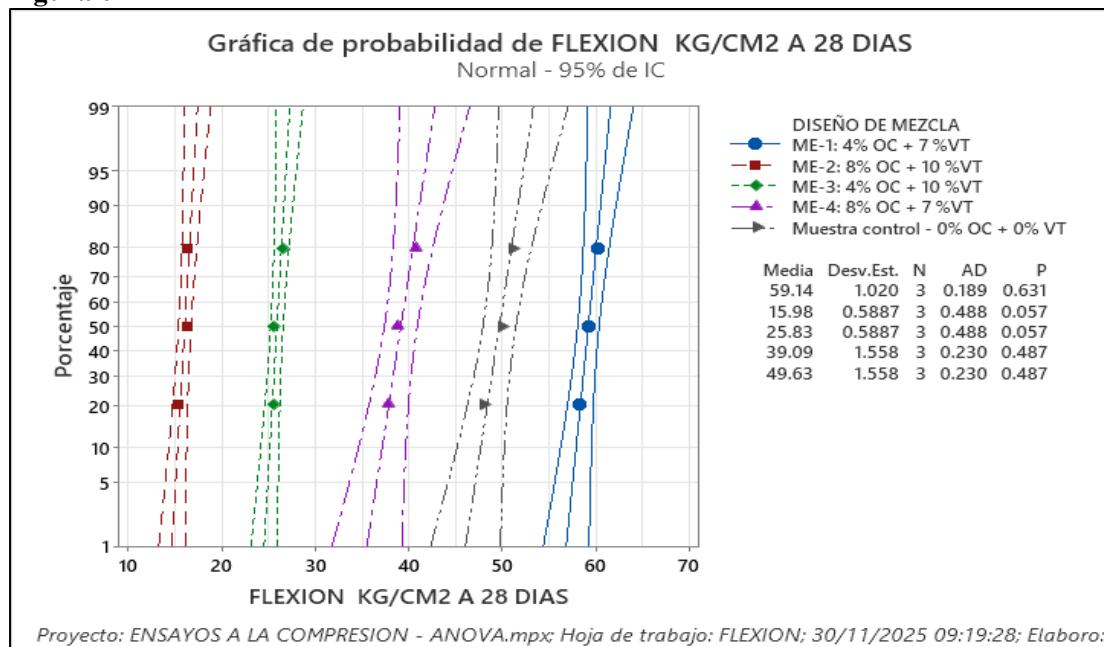


Figura 061. Grafica de evolución de la resistencia a la compresión de las muestras.



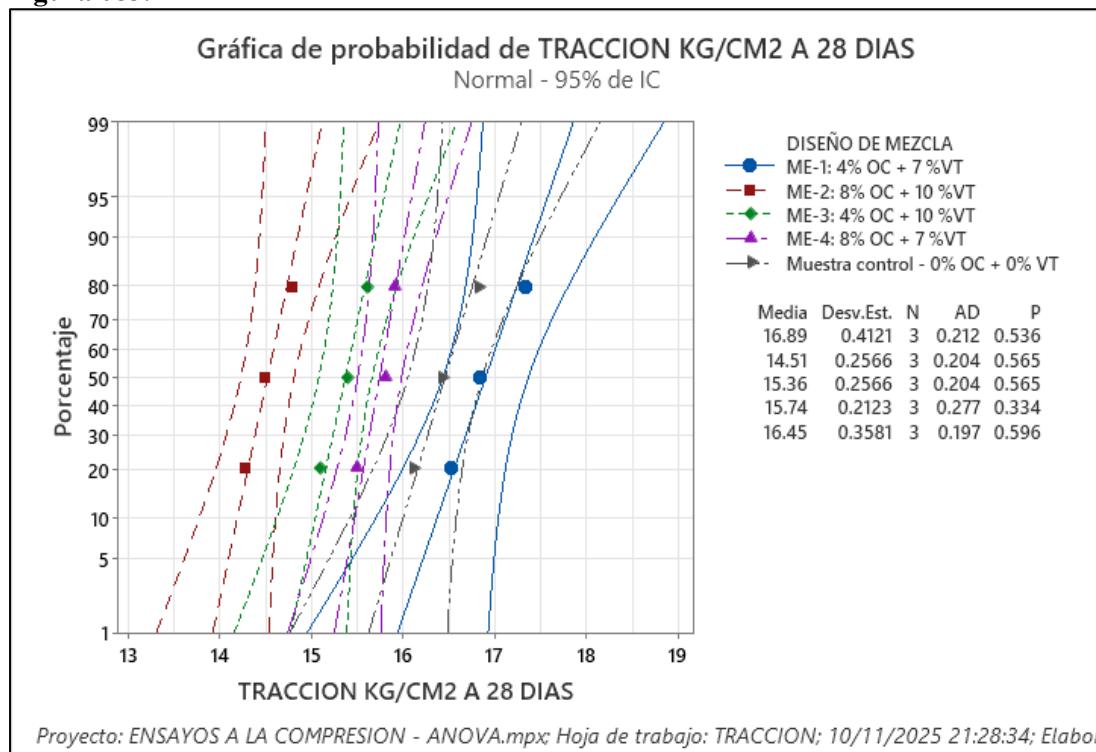
Resistencia a la flexión: Los resultados de la resistencia a la flexión fueron consistentes con los hallazgos de las pruebas de resistencia en adoquines. Las muestras ME-1 (4% CaO + 7% VRT) obtuvieron la mayor resistencia a la flexión, alcanzando un módulo de rotura de 59.14 kgf/cm², mientras que las muestras de control presentaron un módulo de rotura de 49.63 kgf/cm². Este resultado muestra una mejora del 19.16% en la resistencia a la flexión con la adición de CaO y VRT.

Figura 072. Gráfica de evolución de la resistencia a la flexión de las muestras.



Resistencia a la tracción: Los resultados de la resistencia a la tracción fueron consistentes con los hallazgos de las pruebas en adoquines. Las muestras ME-1 (4% CaO + 7% VRT) obtuvieron la mayor resistencia a la tracción, alcanzando un módulo de rotura de 16.89 kgf/cm², mientras que las muestras de control presentaron un módulo de rotura de 16.45 kgf/cm². Este resultado muestra una mejora del 2.67% en la resistencia a la tracción con la adición de CaO y VRT.

Figura 083. Gráfica de evolución de la resistencia a la tracción de las muestras.



Los resultados obtenidos demuestran de manera clara que la incorporación de CaO y VRT en la mezcla de concreto utilizado para los adoquines ecológicos tiene un impacto positivo en sus propiedades mecánicas. La mejora en la resistencia a la compresión, tracción y flexión puede atribuirse a la interacción química entre el óxido de calcio y los componentes del vidrio triturado, los cuales, al ser incorporados en la mezcla de concreto, contribuyen a una mayor densificación y mejor adherencia en la matriz del concreto.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran de manera clara que la incorporación de CaO y VRT en la mezcla de concreto utilizado para los adoquines ecológicos tiene un impacto positivo en sus propiedades mecánicas. La mejora en la resistencia a la compresión, tracción y flexión puede atribuirse a la

interacción química entre el óxido de calcio y los componentes del vidrio triturado, los cuales, al ser incorporados en la mezcla de concreto, contribuyen a una mayor densificación y mejor adherencia en la matriz del concreto.

Resistencia a la compresión: El aumento en la resistencia a la compresión observado en las mezclas con mayor porcentaje de CaO y VRT (ME-2, ME-3 y ME-4) es consistente con estudios previos, como los de Al-Awabdeh et al. (2022), quienes encontraron mejoras similares en la resistencia del concreto con la adición de vidrio triturado reciclado. El óxido de calcio, conocido por sus propiedades activadoras, probablemente facilita la formación de enlaces más fuertes entre las partículas de concreto, lo que refuerza la estructura y aumenta la capacidad de soportar fuerzas compresivas. Este hallazgo también respalda investigaciones de Albayati et al. (2022) que sugieren que la adición de cal mejora la cohesión y la durabilidad de los materiales de concreto.

Resistencia a la tracción y flexión: La mejora en la resistencia a la tracción y a la flexión en la mezcla ME-4 es particularmente relevante en el contexto de pavimentos urbanos, ya que estas propiedades son esenciales para garantizar la estabilidad estructural en condiciones de carga dinámica, como el tráfico vehicular. Estos resultados coinciden con los estudios de Premathilaka et al. (2024), quienes demostraron que la adición de vidrio reciclado puede aumentar la resistencia a la tracción y flexión, mejorando así la capacidad del concreto para resistir cargas repetidas sin fracturarse.

Interacciones entre materiales reciclados y CaO: La combinación de CaO y VRT no solo mejora las propiedades mecánicas del concreto, sino que también contribuye a un modelo más sostenible de construcción. Al sustituir parte de los agregados tradicionales por vidrio reciclado, se reduce la necesidad de extracción de materiales naturales y, a su vez, se da un uso eficiente a los residuos de vidrio, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente con el ODS 12 (producción y consumo responsables). Este estudio también refuerza lo indicado por Zhou y Sun (2020), quienes señalaron que el vidrio reciclado actúa como una fuente potencial de agregados ecológicos, lo que contribuye a la sostenibilidad de los materiales de construcción.

Finalmente podemos indicar que una de las principales contribuciones de este estudio es la identificación de la proporción óptima de CaO y VRT para mejorar las propiedades mecánicas del pavimento articulado ecológico.



Este hallazgo puede aplicarse en la industria de la construcción para diseñar adoquines más resistentes y duraderos, lo que reduciría significativamente los costos de mantenimiento de pavimentos urbanos. Además, la implementación de estas proporciones óptimas en proyectos de infraestructura urbana ayudaría a promover una construcción más responsable y eficiente, que respete los principios de sostenibilidad.

CONCLUSION

El estudio ha demostrado que la incorporación de óxido de calcio (CaO) y vidrio reciclado triturado (VRT) mejora significativamente las propiedades mecánicas del pavimento articulado ecológico, específicamente en términos de resistencia a la compresión, tracción y flexión. Las mezclas con proporciones óptimas de estos materiales reciclados no solo incrementan la durabilidad de los adoquines, sino que también contribuyen a la sostenibilidad de la construcción, al reducir el impacto ambiental mediante el uso de materiales reciclados. Este enfoque no solo ofrece una solución viable para mejorar la infraestructura urbana, sino que también está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo la reutilización de residuos y la construcción responsable. Sin embargo, se recomienda realizar estudios a largo plazo para evaluar la durabilidad en condiciones reales de uso. La aplicación práctica de estos resultados podría transformar la industria de pavimentos ecológicos, ofreciendo alternativas más resistentes y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abd El Fattah, A. (2025). Confinement of concrete cylinders using dry glass fiber hoops: Experimental investigation and analytical modeling. *Results in Engineering*, 25, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103941>
- Adama, S. M., Paul, J. O. S., Alexandre, A. A., & Edjikémé, E. (2020). Recycled Concrete Based on Retour de Toupie Aggregates (Fresh Concrete Waste). *American Journal of Materials Science and Engineering*, 8(1), 1-5. <https://doi.org/10.12691/ajmse-8-1-1>
- Ahmad, J., Zhou, Z., Usanova, K. I., Vatin, N. I., & El-Shorbagy, M. A. (2022). A Step towards Concrete with Partial Substitution of Waste Glass (WG) in Concrete: A Review. *Materials*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma15072525>



- Ahmad, S., Upadhyay, S., Umar, A., & Al-Osta, M. A. (2023). Effect of recycled crushed glass and recycled coarse aggregate on the properties of self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02532. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02532>
- Al-Awabdeh, F. W., Al-Kheetan, M. J., Jweihan, Y. S., Al-Hamaiedeh, H., & Ghaffar, S. H. (2022). Comprehensive investigation of recycled waste glass in concrete using silane treatment for performance improvement. *Results in Engineering*, 16, 100790. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100790>
- Al-Marafi, M. N. I. (s. f.). *Effects of Hydrated Lime on Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete*. Recuperado 6 de octubre de 2025, de <https://www.astrj.com/Effects-of-Hydrated-Lime-on-Moisture-Susceptibility-of-Asphalt-Concrete,135585,0,2.html>
- Bilgen, G., & Altuntas, O. F. (2023). Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01815>
- Bouron, S., Hammoum, F., Ruat, H., Métais, P., & Lesueur, D. (2021). Improving the durability of asphalt mixtures with hydrated lime: Field results from highway A84. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00551. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00551>
- Bustamante-Chavez, M. T., Ramos-Fernández, N. D. M., Farfán Chilicaus, G. C., & Licapa-Redolfo, G. S. (2022). *Influence of the Addition of Recycled Glass on the Compressive Strength of Concrete and Benefit on the Environment: A Review Study*. <https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/meta/FP160.html>
- Chayña, P. R. G., & Ramos, C. E. G. (s. f.). *Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible*.
- Chura Mamani, L. F. (2024). Desarrollo de Adoquines Ecológicos con Vidrio Reciclado bajo Normativa NTP 399.611 para Uso en Pavimentos Peatonales. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 5(3), 1241-1262. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v5i3.266>
- Condori Mamani, L. A. C. (2019). *Tratamiento del Vidrio reciclado para la Producción de Adoquines en Pavimentos Articulados de la Ciudad de Puno*. <https://acortar.link/kbWh5J>



Damrongwiriyupap, N., Wongchairattana, S., Phoo-ngernkham, T., Petcherdchoo, A., Limkatanyu, S., & Chindaprasirt, P. (2023). Influence of Recycled Glass on Strength Development of Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash Mortar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/9418619>

De La Cruz Vega, S. A., Tovar, L. A. L. B. D., Flores, C. M. M., & Oyola, J. A. G. (2022). Resistencia a Compresión Simple Del Concreto Con Yeso Y Residuos De Conchas De Abanico. *Revista Boliviana de Química*, 39(1), 1-9. <https://www.redalyc.org/journal/4263/426371936001/html/>

Devaraj, R., Jordan, J., Gerber, C., & Olofinjana, A. (2021). Exploring the Effects of the Substitution of Freshly Mined Sands with Recycled Crushed Glass on the Properties of Concrete. *Applied Sciences*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/app11083318>

Dinh, H. L., Doh, J.-H., Lu, L., Song, H., & Dongcheon, P. (2023). Comprehensive assessment of geopolymers concrete mechanical and environmental performance with glass cullet fine aggregates. *Journal of Building Engineering*, 76, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107094>

Flores-Alés, V., Martín-del-Río, J. J., Alducin-Ochoa, J. M., & Torres-González, M. (2020). Rehydration on high temperature-mortars based on recycled glass as aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124139>

Gedik, A. (2021). An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, 300, 123980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>

Gołek, Ł. (2022). New insights into the use of glass cullet in cement composites—Long term examinations. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104673>

Guignone, G. C., Vieira, G. L., Zulcão, R., Degen, M. K., Mittri, S. H. M., & Teles, C. R. (2020). Performance of concrete with the incorporation of waste from the process of stoning and polishing of glass as partial replacement of cement. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 13, 613-627. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000300011>



- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Thomas, B. (2022). Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01149. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149>
- Herrera, A. (1998). Notas sobre psicometría. *Bogotá: universidad nacional de Colombia*.
- Indraratna, B., Thayananthan, N., Qi, Y., & Rujikiatkamjorn, C. (2025). A Critical Review of the Utilization of Recycled Glass in Transportation Infrastructure Including Roads and Railways. *Sustainability*, 17(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su17073187>
- Khan, Md. N. N., Saha, A. K., & Sarker, P. K. (2020). Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 28, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101052>
- Kikut Cruz, K., Baldi, A., & Elizondo Salas, A. L. (2020). Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte. *Infraestructura Vial*, 22(39), 12-19. <https://doi.org/10.15517/iv.v22i39.41618>
- Lara, G. W., Mendoza, S. A. D., Montufar, J. C. B., & Ávila, J. C. (2024). Mezclas asfálticas elaboradas con agregado calizo y adición de óxido de calcio probadas a temperaturas de servicio. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n4e377>
- Más-López, M. I., García del Toro, E. M., Luizaga Patiño, A., & Marco García, L. J. (s. f.). *Pavimentos Ecológicos Fabricados con Residuos de Vidrio: Caracterización Física y Mecánica y su Aplicabilidad en la Estabilización de Suelos*. Recuperado 6 de octubre de 2025, de <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/17/3727>
- Milla Montes, E. L. (2023). Incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en el concreto. *Epistemus (Sonora)*, 17(34), 15-23. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.253>
- Muñoz. (2015). *Como elaborar y asesorar una investigación de tesis*.
- Nafisa, T., & Rabin, T. (2020). (PDF) Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.2174/1874347102013010001>



- Premathilaka, K. K. W., Liyanapathirana, D. S., Leo, C. J., & Hu, P. (2024). Application of recycled waste glass to replace traditional quarried aggregates: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 86, 108846. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108846>
- Redondo-Mosquera, J. D., Sánchez-Angarita, D., Redondo-Pérez, M., Gómez-Espitia, J. C., & Abellán-García, J. (2023). Desarrollo de hormigón de ultra alto rendimiento con cemento de alto contenido en C 3 A y vidrio reciclado de gran volumen. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01906. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01906>
- Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. Á., Zamora Mondragón, J. E., Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. Á., & Zamora Mondragón, J. E. (2022). Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 179-192. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202022000100179&lng=es&nrm=iso&tlang=en
- Şengül, C. E., Ayyıldız, D., İskender, E., & Aksoy, A. (2022). The Effect of Hydrated Lime Mixing Forms and Ratios on Performance in Asphalt Pavements. *Teknik Dergi*, 33(4), Article 4. <https://doi.org/10.18400/tekderg.902668>
- Ting, G. H. A., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2021). Experimental measurement on the effects of recycled glass cullets as aggregates for construction 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, 300, 126919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126919>
- Toala, F. S. P., Naula, J. P. A., & Herrera, J. V. A. (2020). Utilización del vidrio triturado como material de construcción en cantón Santo Domingo. *SATHIRI*, 15(2), 208-2019. <https://doi.org/10.32645/13906925.998>
- Tushar, Q., Salehi, S., Santos, J., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Arashpour, M., & Giustozzi, F. (2023). Application of recycled crushed glass in road pavements and pipeline bedding: An integrated environmental evaluation using LCA. *Science of The Total Environment*, 881, 163488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163488>
- Varas-Ramírez, J. B., & Areche-García, J. N. (2021). Comportamiento mecánico del adoquín de hormigón adicionando residuos orgánicos del maíz. *Dominio de las Ciencias*, 7(5), 148-168. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i5.2240>



Villagran-Vázquez, Y., Fuente, A. G. de la, Volpi-León, V., Vital-Hernández, S. E., Acosta-Hernández, L. Á., & López-León, L. D. (2024). Diseño de pavimento rígido con sustitución de agregados por arena sílica. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12, 92-98. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13470>

Villanueva Bazán, H. J., & Gonzaga Toribio, J. J. (2023). Concrete of 210 kg/cm² with Addition of Recycled Glass Before Pathogenic Agents. *LACCEI*, 1(8), Article 8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.770>

Wang, H., Wen, B., Xu, P., Gao, G., Zhang, L., & Niu, D. (2025). Efecto del curado con CO₂ sobre la resistencia y la microestructura del hormigón compuesto de vidrio de desecho. *Construction and Building Materials*, 463, 140042. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140042>

Yashoda Rani, G., Jaya Krishna, T., & Murali, K. (2021). Strength studies on effect of glass waste in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8817-8821. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.328>

Zaremotekhases, F., Sadek, H., Hassan, M., & Berryman, C. (2022). Impact of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement content on the performance of alternative asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 319, 126035. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126035>

Zhou, L., & Sun, Y. (2020). Determination of Hydrated Lime Content Based on Asphalt Mastic High Temperature Performances. *E3S Web of Conferences*, 145, 02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502029>

