

Influence of rice husk ash and recycled glass powder on physical-mechanical properties of concrete in rigid pavement

Karol K. Lopez Fernandez¹ ; Chavely S. Suarez Alcántara² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú
U21212119@utp.edu.pe, U21208305@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Abstract — *The search for sustainable alternatives in civil construction has driven the use of agricultural and industrial byproducts to optimize concrete performance and reduce its environmental impact. This research evaluates the reduction in cement and fine aggregate usage through the inclusion of alternative materials such as rice husk ash (RHA) and recycled glass powder (GGP), respectively, analyzing their effect on the physical and mechanical parameters of 27.46 MPa rigid pavement concrete. Ten mix designs were prepared with proportions of 0%, 5%, 10%, and 20% RHA and 0%, 10%, 15%, and 20% GGP, under controlled curing and testing conditions for 28 days. The results show that the incorporation of CCA increased compressive and flexural strength by up to 15%, thanks to its high silica content, which promotes the formation of hydrated calcium silicate gels. Meanwhile, PVR improved density and reduced porosity by acting as a micro-filler, strengthening the concrete matrix. This combination resulted in a more compact structure with better particle packing and greater durability under load and surface wear. The best-performing mixture was the one with 5% CCA and 20% PVR, achieving the optimal balance between strength, compactness, and sustainability, making it an efficient and environmentally friendly alternative for rigid pavement construction.*

Keywords-- *Rice husk ash, recycled glass powder, compressive strength, flexural strength, concrete*

Influencia de ceniza de cáscara de arroz y polvo de vidrio reciclado en propiedades físico-mecánicas del concreto en pavimento rígido

Karol K. Lopez Fernandez¹ ; Chavely S. Suarez Alcántara² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú
U21212119@utp.edu.pe, U21208305@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Resumen – La búsqueda de alternativas sostenibles en la construcción civil ha impulsado el aprovechamiento de subproductos agrícolas e industriales para optimizar el comportamiento del concreto y reducir su impacto ambiental. Esta investigación evalúa la reducción del uso de cemento y agregado fino gracias a la inclusión de materiales alternativos como lo es ceniza de cáscara de arroz (CCA) y polvo de vidrio reciclado (PVR) respectivamente, analizando su efecto en los parámetros físicos y mecánicos del concreto para pavimento rígido de 27.46 Mpa. Se elaboraron diez diseños de mezcla con proporciones del 0%, 5%, 10% y 20% de CCA y del 0%, 10%, 15% y 20% de PVR, bajo condiciones de curado y ensayo controladas durante 28 días. Los resultados muestran que la incorporación de CCA produjo un aumento en las resistencias compresiva y flexional hasta un 15%, gracias a su alto contenido de sílice que favorece la formación de geles de silicato de calcio hidratado, mientras que el PVR mejoró la densidad y redujo la porosidad al actuar como micro-relleno, fortaleciendo la matriz del concreto. De esta manera, la combinación de ambos generó una estructura más compacta, con mejor empaquetamiento de partículas y mayor durabilidad frente a cargas y desgaste superficial. El mejor desempeño fue la mezcla con 5% de CCA y 20% PVR logrando el equilibrio óptimo entre resistencia, compacidad y sostenibilidad, constituyendo una alternativa eficiente y ecológica para la construcción de pavimento rígido.

Palabras clave -- Ceniza de cáscara de arroz, polvo de vidrio reciclado, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, concreto.

I. INTRODUCCION

El uso del concreto en pavimentos rígidos es común, ya que ofrece alta resistencia, buena durabilidad y una gran versatilidad constructiva. Sin embargo, la elevada demanda de cemento Portland en su elaboración produce un notable impacto ambiental por la liberación de CO₂ junto con el considerable uso de recursos naturales. [1]. Con el objetivo de encontrar alternativas sostenibles que conserven el comportamiento físico y la respuesta mecánica que presenta el concreto, varios estudios han analizado el uso de residuos agroindustriales y urbanos. Entre estos destacan la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y el polvo de vidrio reciclado (PVR), materiales con potencial para reemplazar parcialmente al cemento y al agregado fino, respectivamente [2].

La existencia de dos carreteras urbanas de Lima Este, que tienen importancia por su ubicación estratégica e

interconexión, tienen pavimentos rígidos de 27.46 Mpa que presentan fallas frecuentes debido a la fatiga estructural y a los problemas en la resistencia mecánica frente a cargas pesadas. De este modo, el estudio analiza la incidencia de integrar parcialmente CCA y PVR en el desempeño físico y mecánico del concreto, con el fin de optimizar su desempeño estructural y fomentar su sostenibilidad ambiental [3].

La CCA es un subproducto obtenido durante el procesamiento del arroz, compuesta en un 85–95 % por sílice amorfa. Cuando se calcina entre 600 °C y 700 °C y se muele hasta una finura menor de 75 µm, desarrolla propiedades puzolánicas que reaccionan con el compuesto cálcico generado por la hidratación del cemento, dando origen a geles C–S–H adicionales que densifican la matriz y mejoran la resistencia a compresión [4].

Los estudios muestran que al sustituir entre 5 % y 20 % del cemento por CCA, se evidencia una mejora considerable en la respuesta del concreto frente a esfuerzos mecánicos, alcanzando aumentos del 10 % al 15 % en la resistencia a compresión cuando se aplica un reemplazo del 10 %, mientras que porcentajes de 15 % logran mantener la trabajabilidad y la cohesión sin reducir la resistencia a flexión [5], [6]. Asimismo, al emplear partículas finas con forma irregular y textura rugosa, la CCA mejora la adherencia con la pasta y reduce la porosidad, optimizando el desempeño frente al tránsito pesado [7].

Por otro lado, el PVR proviene del molido de residuos de vidrio postconsumo hasta tamaños menores de 75 µm, donde predomina una composición de sílice (70–75 %) con textura angular y superficie vítrea. Este material funciona como reemplazo parcial del agregado fino, favoreciendo la compactación y reduciendo los vacíos en la estructura del concreto [8]. En los estudios revisados, se han empleado reemplazos del 10 %, 15 % y 20 % del agregado fino por PVR, observándose incrementos en la resistencia a compresión que varían entre el 8 % y el 18 %, y en la resistencia a flexión de hasta 12 %, con comportamiento óptimo en el rango del 15 % [9], [10]. Además, su forma angular favorece el anclaje mecánico con la pasta, reduciendo microfisuras y mejorando la cohesión interna [11].

El análisis del conocimiento actual sobre el uso de la CCA y el PVR como materiales de sustitución parcial en el

concreto revela que ambos contribuyen significativamente al incremento de las propiedades mecánicas y a la sostenibilidad del material. En el caso de la CCA, diversos estudios han evidenciado que reemplazos del 10 % del cemento incrementan la resistencia a compresión en un 12–15 % y mejoran la densificación de la matriz al reducir la porosidad capilar [1], [4], [5]. Asimismo, otras investigaciones muestran incrementos del 10–14 % en resistencia a flexión con sustituciones del 10–15 %, atribuidos a una mejor adherencia entre la mezcla cementante y el agregado [6], [7]. También se reporta que reemplazos del 20 % reducen la permeabilidad y la absorción de agua, aunque pueden afectar ligeramente la trabajabilidad, por lo que se recomienda mantener porcentajes intermedios para equilibrar desempeño y manejabilidad [8]. En conjunto, los resultados para la CCA indican que los porcentajes óptimos se encuentran entre 10–15 %, donde se alcanza el mejor equilibrio entre resistencia, durabilidad y desempeño mecánico.

En cuanto al PVR, los resultados experimentales evidencian su efectividad empleada para sustituir parcialmente al agregado fino. Los estudios muestran que un 15 % de reemplazo eleva la resistencia compresiva en un 12 % y la flexional en un 10 %, conservando una buena trabajabilidad y cohesión. [9]. Otras investigaciones observaron mejoras de 8–18 % en compresión y 10–12 % en flexión con reemplazos del 10–20 %, destacando el efecto de micro-relleno y el aumento de la densidad de la mezcla [10]. También se ha evidenciado que el 15 % de PVR genera incrementos de 15 % en compresión y 12 % en flexión, atribuidos al tamaño fino de partícula ($<75 \mu\text{m}$) y a su forma angular, que permite un mejor anclaje en la matriz cementicia [11]. Además, se ha destacado que las partículas de vidrio molidas entre 45 y $75 \mu\text{m}$ reducen la porosidad y mejoran la rigidez, mientras que el uso simultáneo de vidrio y agregados reciclados mantiene resistencias estables y una buena cohesión interna a 28 días de curado [12], [13].

Comparativamente, los estudios muestran que la CCA actúa mediante una reacción química puzolánica, reforzando la matriz del concreto, mientras que el PVR ejerce un efecto físico de micro-relleno, mejorando la densidad y distribución de vacíos. Los rangos más eficientes para ambas sustituciones son 10–15 % para la CCA y 10–20 % para el PVR, obteniéndose incrementos combinados de 10–18 % en compresión y 8–15 % en flexión después de 28 días de curado. Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del uso combinado de ambos materiales para pavimentos rígidos, aportando mayor resistencia, densidad y durabilidad, así como un impacto ambiental reducido.

La integración conjunta de ambos materiales representa una innovación en la ingeniería civil peruana, ya que combina la reacción puzolánica de la CCA con el efecto físico de micro-relleno del PVR; además, aunque sus efectos han sido estudiados de forma independiente, la evaluación simultánea de ambos en pavimentos rígidos no ha sido ampliamente documentada, por lo que esta investigación se constituye en un aporte técnico y científico relevante. En este sentido, la

propuesta tiene como objetivo disminuir el uso de cemento Portland, impulsar el aprovechamiento de residuos agrícolas y urbanos, y promover una construcción sostenible acorde con los principios de la economía circular; asimismo, contribuye a extender la vida útil del pavimento y a mejorar su comportamiento ante cargas dinámicas, condiciones indispensables en vías con tránsito pesado como las de Lima Este [3], [10].

El objetivo del efecto de la inclusión de ceniza de cáscara de arroz para sustituir en parte al cemento Portland tipo I, junto con el uso de polvo de vidrio reciclado como sustituto de una fracción del agregado fino, evaluando su efecto en las características físico-mecánicas del concreto para pavimento rígido de 27.46 Mpa, mediante diez formulaciones de mezcla con proporciones de 0%, 5 %, 10 % y 20 % de CCA, y 0%, 10 %, 15 % y 20 % de PVR, sometiendo las muestras a pruebas de compresión y flexión al cumplir 28 días bajo un enfoque de diseño multifactorial, con el fin de determinar los porcentajes óptimos de reemplazo que maximicen el desempeño estructural y la durabilidad del concreto.

II. METODOLOGIA

Este estudio se basa en la evaluación experimental del concreto modificado con una adición binaria compuesta por CCA y PVR, usados como reemplazo parcial del cemento Portland Tipo I y del agregado fino natural respectivamente. La CCA presenta una composición química muy distinta al cemento Portland tradicional (CPT), destacando por su alto contenido de sílice (96 %), frente al 20–25 % del CPT. Esta elevada proporción de SiO_2 la convierte en un material adecuado para sustituciones parciales del cemento debido a su alta reactividad puzolánica. En contraste, el CPT posee una composición más equilibrada de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , propios de la matriz cementicia [1].

Por otro lado, el PVR y el agregado fino natural presentan similitudes en sus propiedades físicas y granulométricas, ya que ambos poseen partículas menores a 4.75 mm y cumplen con las especificaciones de la NTP 400.012 [14]. Además, su composición favorece la densidad y cohesión del concreto. Estas similitudes permiten que el polvo de vidrio actúe como un sustituto adecuado y sostenible del agregado fino, manteniendo la trabajabilidad y resistencia del concreto [15].

A. Materiales

1) *Agregado fino*: El material es proveniente de la cantera Trapiche del distrito de Los Olivos, componente limpio y libre de impurezas orgánicas, arcillas o sustancias perjudiciales, cumpliendo con la NTP 400.037:2014 [16]. Presenta una granulometría bien graduada con una finura de 2.94, un peso específico de 2.64 g/cc, humedad natural de 1.10 %, absorción de 1.70 %, peso unitario suelto de 1506 kg/m^3 y compactado de 1763 kg/m^3 , propiedades que garantizan una mezcla trabajable, cohesiva y adecuada para concreto.

2) *Agregado grueso*: El material empleado corresponde a piedra chancada de origen ígneo, proveniente de la cantera

Trapiche del distrito de Los Olivos, con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y predominio de partículas retenidas en la malla N°4, cumpliendo con la NTP 400.037:2018 [17]. Las propiedades físicas obtenidas en laboratorio muestran un peso específico de 2.65 g/cc, un módulo de fineza de 6.90, una humedad natural de 0.60 %, una absorción de 1.10 %, así como un peso unitario suelto de 1420 kg/m³ y compactado de 1611 kg/m³, características que garantizan su estabilidad, resistencia y adecuada participación en mezclas de concreto.

3) *Cemento*: Se incorporó cemento Portland Tipo I de la marca Cemento Sol (43 MPa), cumpliendo con los criterios estipulados de la NTP 334.009:2020. Se distribuye en presentaciones de sacos 42.5 kg, cumpliendo con los requisitos de calidad establecidos por INACAL, lo que garantiza su idoneidad destinada a elaborar concretos de resistencia media y elevada, de acuerdo con los estándares de las normas técnicas peruanas vigentes [18].

La composición físicas y químicas del cemento se detalla en la Tabla I.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CEMENTO.

Propiedades	UNACEM (2024)
Propiedades químicas	%
MgO	2.9
Na ₂ O	2.10
So ₃	2.9
C ₂ S	12
Propiedades físicas	%
Contenido de aire	7
Color	Gris verdusco
Densidad específico (g/cm ³)	3.13

4) *Agua*: Se hizo uso de agua potable proveniente de la red pública del laboratorio del distrito de Los Olivos, conforme a la NTP 339.088:2014 (Agua para amasado del concreto – Requisitos).

Asimismo, presenta el nivel de pureza requerido para asegurar un proceso de hidratación correcta del cemento, mezcla y curado del concreto, asegurando el correcto desarrollo de su resistencia y durabilidad [20].

5) *Ceniza de cascarilla de arroz*: La ceniza de cáscara de arroz (CCA) implementada en el desarrollo del presente estudio fue obtenida de la empresa agrónoma Perla del Norte, ubicada en Chiclayo, a partir de la combustión controlada en horno, elevando la temperatura gradualmente de 20 °C/min hasta 600 °C/min durante seis horas y permitiendo luego el enfriamiento a temperatura ambiente. Este proceso garantizó la obtención de una CCA gris como se visualiza en la Fig. 1, con un tamaño de partícula entre 25 y 45 µm, densidad aparente de 710 kg/m³, peso específico de 2,12 e índice puzolánico del 82,50 %, lo que evidencia su alta reactividad. Por tanto, la CCA obtenida bajo estas condiciones presenta una composición química y física óptima para su utilización como adición mineral en las formulaciones de concreto, siguiendo las normas previamente estipuladas por la Norma Técnica NTP 334.090:2016 [21]. Se observa en la Tabla II las características físicas y químicas del CCA [5], [6], [7].

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE CCA.

Propiedades	Sandeep et al., (2022)	Kurrae et al., (2021)	Saeid et al., (2021)
Propiedades químicas (%)			
SiO ₂	92.76	86.94	86.02
Al ₂ O ₃	0.79	0.20	0.36
Fe ₂ O ₃	1.98	0.10	0.16
MgO	-	0.2 - 0.6	0.39
CaO	3.85	0.3 - 2.2	1.12
Na ₂ O	0.40	0.1 - 0.8	1.15
K ₂ O	0.42	2.15 - 2.30	-
Propiedades físicas			
Color	-	Gris	-
Tamaño	-	< 25 µm	-
Densidad relativa	-	2.3	-
Peso específico	-	-	2.1
Área de superficie específica (cm ² /gr)	-	-	3500

6) *Polvo de vidrio reciclado (PVR)*: Este estudio se centra en el reciclaje y la reutilización de 40 envases de vidrio de 1,5 L provenientes de gaseosas Inca Kola y Coca-Cola, cuyos recipientes presentan un color translúcido característico de los envases descartados tras su uso en el consumo doméstico peruano. Posteriormente, paso un proceso de trituración en tamaños mayores, luego se lleva a la máquina de los ángeles de abrasión durante un periodo de 30 a 60 minutos para obtener el polvo de vidrio en tamaño menores. Este filtro se da porque se busca el reemplazo parcial del agregado fino, cuyas partículas pasan por el Tamiz N°4 de granulometría, es decir, el diámetro nominal de los granos de vidrio reciclado tendrá medidas menores a 4.75 mm según lo estipulado en la Norma Técnica Peruana 400.012 [14]. La obtención del polvo de vidrio se visualiza en la Fig. 2, asimismo en la Tabla III se observa la constitución física y química del vidrio [11], [12], [15].

TABLA III
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL POLVO DE VIDRIO

Autores	Raja et al., (2024)	Lee et al., (2020)	Gobinath et al., (2013)
Propiedades químicas	%	%	%
SiO ₂	64.32	53	67.33
CaO	18.18	23.6	12.45
MgO	-	0.6	2.738
Al ₂ O ₃	2.90	14.5	2.62
Fe ₂ O ₃	0.53	-	1.42
P ₂ O ₅	-	-	0.051
Na ₂ O	13.05	1.1	12.05
K ₂ O	1.56	0.2	0.638
B ₂ O ₃	-	7.6	-
Propiedades físicas	%	%	%
Gravedad específica	2.98	-	-
Ph	-	-	10.42



Fig. 1. Proceso de CCA: (a) Cascarrilla de cáscara de arroz, (b) Combustión en horno, (c) Ceniza de cascara de arroz



Fig. 2. Proceso del PVR: (a) Botella Coca cola, (b) Trituración a tamaños mayores, (c) Molienda en máquina de los Ángeles, (d) PVR pulverizado

B. Diseño

El diseño de mezcla se efectuó siguiendo el procedimiento por volúmenes y las recomendaciones del ACI 211.1 complementadas con los lineamientos de las normas E.060 para concreto armado y CE.010 para pavimentos urbanos del RNE, con el propósito de obtener un concreto para pavimento rígido cuya resistencia característica sea 27.5 MPa a 28 días [22,23]. En la Tabla IV puede observarse la formulación del concreto convencional; la cual sirve como referencia para comparar los efectos de las sustituciones parciales. Para ello, se consideró realizar un análisis multifactorial que permita estudiar simultáneamente múltiples variables y sus interacciones en las propiedades del concreto, así optimizando los diseños de mezcla y analizando todas las combinaciones posibles.

Para las mezclas experimentales se plantearon diez diseños con sustituciones parciales de la incorporación de CCA para sustituir el cemento en dosis del 0%, 5 %, 10 % y 20 %, y de PVR en cambio del árido fino en cantidades del 0%, 10 %, 15 % y 20 %. De igual manera, se empleó una relación agua-cemento (a/c) constante de 0.48 para todas las mezclas elaboradas, para asegurar la trabajabilidad y las condiciones adecuadas de resistencia en todas las mezclas. Los contenidos iniciales de agua y agregado grueso se mantienen constantes y se ajustaron luego de las mezclas experimentales para alcanzar el asentamiento (slump) previsto y la proporción agua/cemento establecido en pavimentos rígidos, de acuerdo con la norma ACI 211.1 y las NTP vigentes [23], [24].

TABLA IV
DISEÑO DE MEZCLAS MULTIFACTORIALES

Código	Diseño/Muestra	Cemento (Kg/m³)	CCA (Kg/m³)	Agregado Fino (Kg/m³)	PVR (Kg/m³)	Agregado Grueso (Kg/m³)	Agua (Kg/m³)
M1	0% CCA+ 0% PVR	445	0.00	693	0.00	995	214
M2	5% CCA + 10 PVR	423	22	623	70	995	214
M3	10% CCA + 10 PVR	401	44	623	70	995	214
M4	20% CCA + 10 PVR	356	89	623	70	995	214
M5	5% CCA + 15 PVR	423	22	589	104	995	214
M6	10% CCA + 15 PVR	401	44	589	104	995	214
M7	20% CCA + 15 PVR	356	89	589	104	995	214
M8	5% CCA + 20 PVR	423	22	554	139	995	214
M9	10% CCA + 20 PVR	401	44	554	139	995	214
M10	20% CCA + 20 PVR	356	89	554	139	995	214

C. Ensayos físicos

1) *Evaluación Granulométrica:* El desarrollo granulométrico posibilita identificar cómo se clasifican los tamaños de los fragmentos presentes en el árido fino como del agregado grueso, siendo esencial para controlar la trabajabilidad, compactación y resistencia del concreto. De acuerdo con la NTP 400.012:2013 (equivalente a ASTM C136), el procedimiento consiste en secar la muestra hasta peso constante a 110 ± 5 °C, para luego tamizarla mecánicamente mediante una serie de tamices normalizados [14].

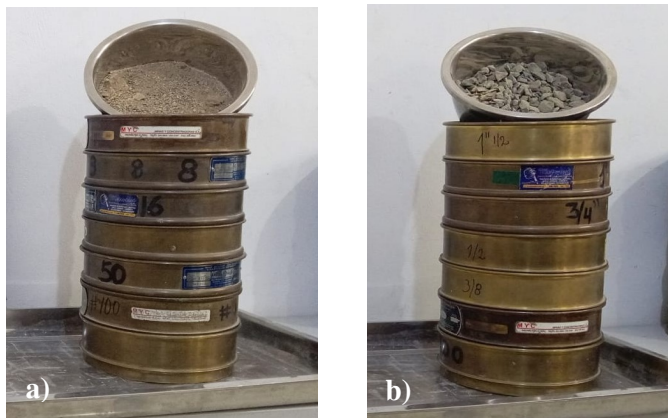


Fig. 3. Ensayo granulométrico: a) Agregado fino, b) Agregado grueso

2) *Ensayo de Asentamiento (Slump):* La consistencia del concreto fresco fue determinada utilizando la prueba de revenimiento realizada con el cono de Abrams, como se observa en la Fig.3, siguiendo los procedimientos especificados en la norma NTP 339.035: 2009-ASTM C143 [25]. Este ensayo fue ejecutado de forma inmediata tras concluir el mezclado del concreto, con la finalidad de verificar su nivel de trabajabilidad y asegurar que cumpla con las condiciones necesarias de calidad y durabilidad en su estado fresco.



Fig. 4 Ensayo de asentamiento del concreto fresco.

3) *Temperatura:* La determinación de la temperatura del concreto se efectuó conforme a los procedimientos establecidos en la norma NTP 339.184:2014 - ASTM C1064 [26]. El control térmico se llevó a cabo de manera inmediata tras la obtención de la mezcla, con el fin de confirmar que el

material no presente valores excesivos que pudieran generar fisuras por efectos de contracción térmica.

D. Ensayos mecánicos

1) *Ensayo de resistencia a la compresión:* El procedimiento se desarrolló de acuerdo a los lineamientos establecidos en la normativa NTP 339.034:2008 (ASTM C39), las probetas cilíndricas de 4 x 8 pulg. se sometió a curado durante 28 días. Posteriormente, se colocan en una máquina de compresión hidráulica de al menos 2000 kN de capacidad, ejerciendo una acción mecánica de manera continua y uniforme hasta provocar la rotura, tal como se aprecia en la Fig. 5 [27].

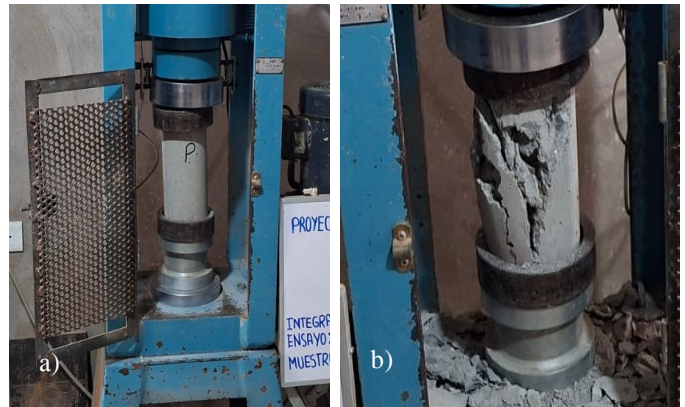


Fig. 5. Ensayo de resistencia a la compresión: a) Colocación de probeta 5%CCA+10%PVR, b) Punto máximo de rotura.

2) *Ensayo de flexión:* Este ensayo evalúa la aptitud del concreto ya fraguado para soportar solicitaciones de tensión aplicadas de forma indirecta en su parte inferior cuando es sometido a cargas de flexión. Según la NTP 339.083:2005 (ASTM C78), se realizó 20 muestras prismáticas de $15 \times 15 \times 50$ cm apoyadas sobre dos puntos y cargadas en el tercio medio [28], como se ve en la Fig.6

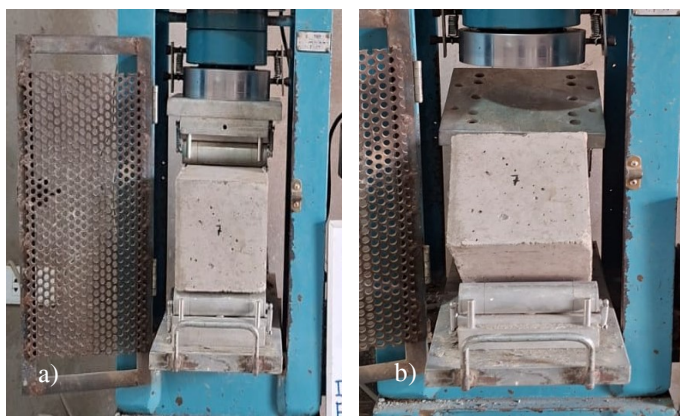


Fig. 6. Ensayo de resistencia a la flexión: a) Colocación de vigueta 5%CCA+10%PVR, b) Punto máximo de rotura.

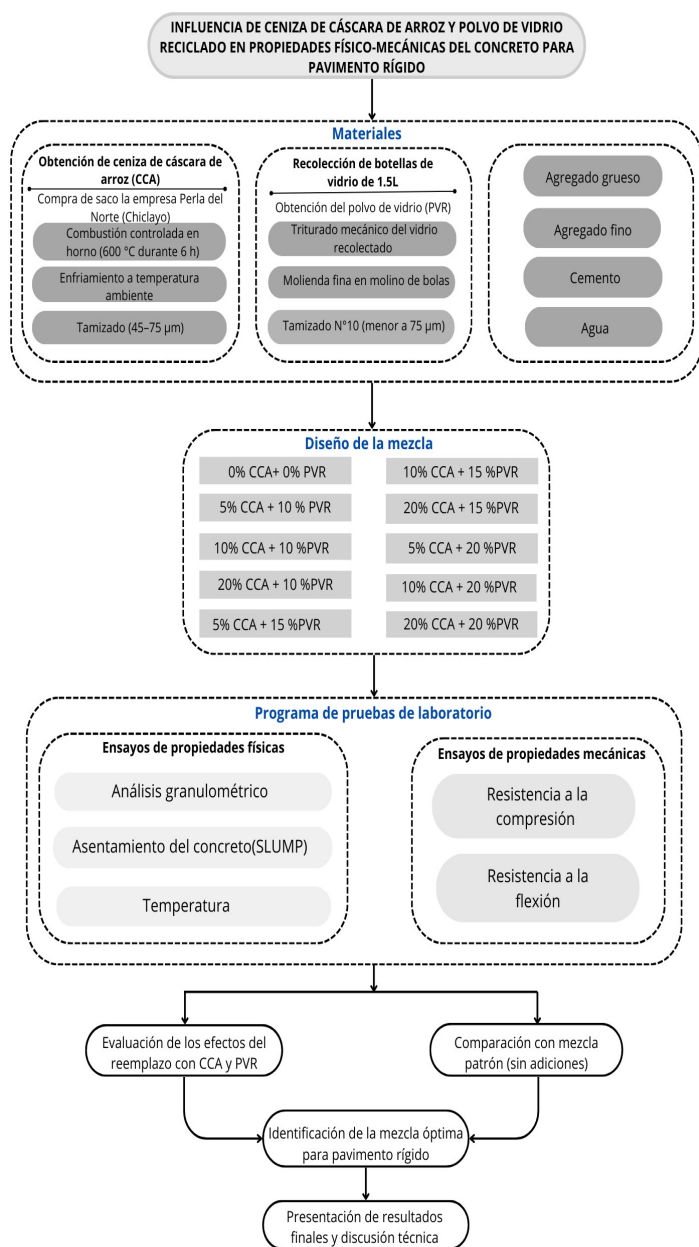


Fig. 7. Diagrama de flujo de investigación

III. RESULTADOS

A. Propiedades físicas

1) **Análisis granulométrico:** Durante el análisis de la gradación de los elementos granulares, se evidencia en la Fig. 8 que el agregado fino está compuesto principalmente por arena (90.93 %), con 6.56 % de finos y solo 2.50 % de grava, mostrando una curva continua y descendente entre las mallas N° 4 y N° 200, propia de un material bien graduado y dentro de los límites de ASTM C33 y NTP 400.037. Por otro lado, el agregado grueso presenta 95.24 % de grava, con mínima

presencia de finos (0.91 %) y arena (3.86 %), concentrando su mayor retención entre 3/8" y N° 4, lo que confirma una granulometría uniforme y adecuada para concretos de resistencia media a alta. Esta combinación complementaria entre ambos agregados mejora la compactación y reduce vacíos en la mezcla. Asimismo, el índice que describe la finura del material arenoso empleado presenta un valor de (2.94) que lo clasifica como arena media adecuada para concretos convencionales, mientras que el del agregado grueso (6.90) corresponde a una grava gruesa bien graduada, con baja superficie específica y menor demanda de pasta cementante.

2) **Temperatura del concreto (°C):** En lo que corresponde a las temperaturas, los resultados oscilaron entre 24.2 °C y 25.5 °C, dentro del rango permitido por la NTP 339.184 (≤ 32 °C), mostrando un comportamiento estable y sin variaciones térmicas significativas entre las muestras. Como se observa en la Fig. 9, el valor más alto (25.5°C) corresponde a la mezcla con 5 % de CCA y 10 % de PVR, mientras que el valor más bajo (24.2 °C) se presenta en la mezcla con 20 % de CCA y 15 % de PVR.

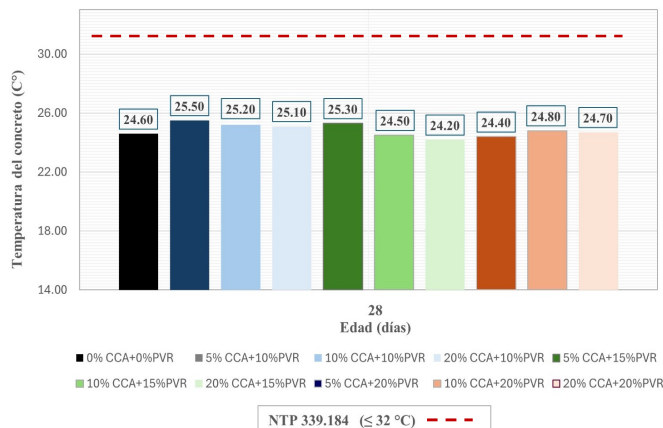


Fig. 9. Resultados de la temperatura del concreto

3) **Asentamiento o Slump ("):** En la prueba de consistencia realizado para las diferentes mezclas, los valores obtenidos se mantuvieron entre 2" y 4", rango compatible con los requisitos de trabajabilidad para este tipo de aplicación. Como se muestra en la Fig. 10, el mayor asentamiento (4") correspondió a la mezcla patrón (0 % CCA + 0 % PVR), mientras que el valor mínimo (2") se registró en la mezcla con 20 % CCA + 10 % PVR. Se observó una reducción progresiva del slump conforme aumentó la incorporación de CCA y PVR, reflejada principalmente en las mezclas con mayores porcentajes de sustitución. Aun así, las combinaciones con reemplazos moderados (entre 5 % y 10 %) conservaron asentamientos dentro del rango adecuado para su colocación en pavimentos rígidos, manteniendo la consistencia requerida para garantizar correcta compactación y acabado superficial.

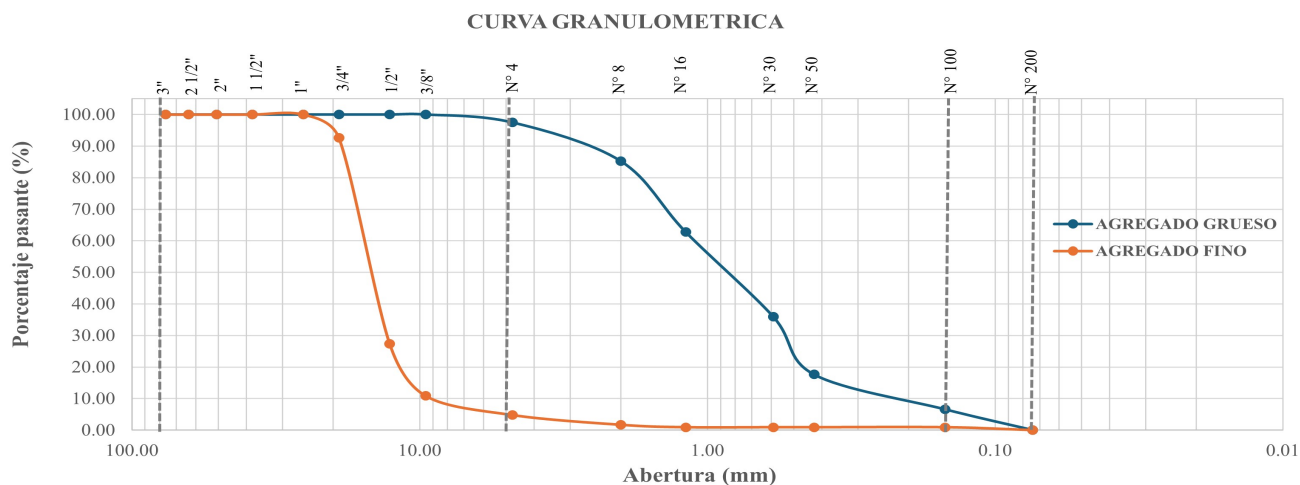


Fig. 8. Agregado fino y grueso

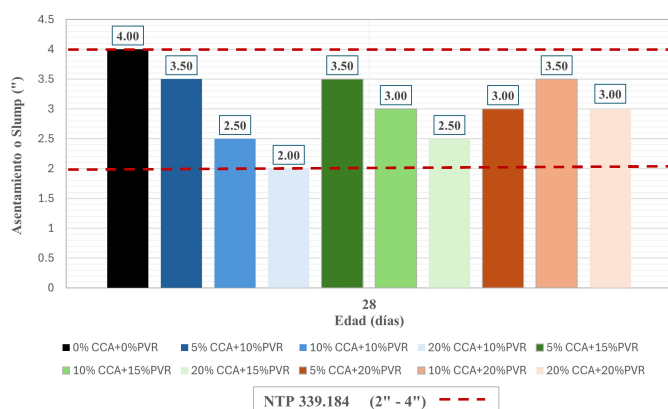


Fig. 10. Resultados del ensayo de revenimiento o slump

B. Propiedades mecánicas

1) **Resistencia a la compresión:** La Fig. 11 muestra que la mezcla patrón alcanzó un valor de 29.43 MPa a los 28 días, cumpliendo con la Norma Técnica Peruana CE.010 “Pavimentos Urbanos”, que exige el mínimo de 27.46 MPa. Además, se observa que tres mezclas superaron a la resistencia normativa: M2 (29.74 MPa), M5 (28.39 MPa) y M8 (30.35 MPa). Estas mezclas presentan incrementos significativos respecto a la base normativa: 8.37%, 3.37% y 10.50%, respectivamente, evidenciando que niveles moderados de sustitución con 5% de CCA generan un efecto favorable y consistente en la resistencia mecánica. La mezcla 5% CCA + 20% PVR destaca como la de mayor desempeño, superando incluso al patrón en casi 1 MPa. Por el contrario, composiciones con mayores porcentajes de CCA, como M3 (25.26 MPa), M4 (24.68 MPa) y M7 (20.19 MPa), mostraron caídas pronunciadas, todas por debajo del límite normativo, reflejando una pérdida de cohesión y una reducción del

cemento disponible para la hidratación. Según la Tabla V el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) mostró valores comprendidos entre 0.24 y 1.77 MPa, lo que evidencia una adecuada consistencia en los resultados obtenidos de las probetas evaluadas.

TABLA V
RESULTADOS DE COMPRESION A 28 DIAS.

Diseños	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	$\bar{x}$	σ
M1	28.97	29.92	29.39	29.43	0.48
M2	29.75	28.97	30.51	29.74	0.77
M3	25.37	25.42	24.98	25.26	0.24
M4	25.51	23.86	24.66	24.68	0.82
M5	29.69	27.82	27.66	28.39	1.13
M6	25.09	25.41	28.10	26.20	1.65
M7	19.00	19.82	21.74	20.19	1.41
M8	32.25	28.76	30.02	30.35	1.77
M9	27.63	26.28	26.74	26.88	0.68
M10	25.85	26.23	27.04	26.37	0.61

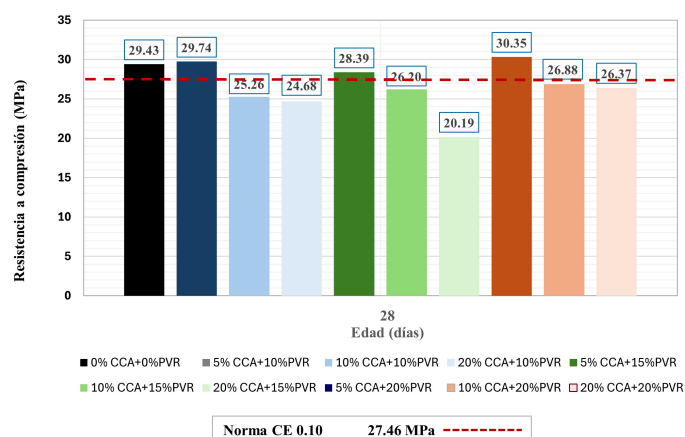


Fig. 11. Resistencia a compresión a los 28 días.

2) *Resistencia a la flexión*: La evaluación de flexión al término del período de curado estándar (28d.), revela como se observa en la Fig. 12, que la mezcla patrón alcanzó una resistencia de 4.26 MPa; valor que cumple con la exigencia mínima de 3.43 MPa establecida por la Norma Técnica Peruana CE.010 “Pavimentos Urbanos”. La mezcla más destacada es el de 5% CCA + 20% PVR, alcanzando 4.38 MPa, equivalente a un incremento del 27.71% respecto al mínimo exigido, seguida por 5% CCA + 10% PVR con 4.29 MPa (25% por encima) y 5% CCA + 15% PVR que obtuvo 4.28 MPa (24.71% superiores). También sobresalió la mezcla 10% CCA + 15% PVR con 3.65 MPa, representando un incremento del 6.43%, manteniéndose por encima de la norma. En contraste, los porcentajes más altos de reemplazo (20% CCA combinado con 10%, 15% y 20% PVR) mostraron disminuciones notorias entre 2.12 y 2.89 MPa, evidenciando pérdida de cohesión y una microestructura menos eficiente.

Según la Tabla VI el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) mostró valores comprendidos entre 0.06 y 0.37 MPa, lo que evidencia una adecuada consistencia en los resultados obtenidos de las probetas evaluadas.

TABLA VI
RESULTADOS DE FLEXION A 28 DIAS.

Diseños	Muestra 1	Muestra 2	$\bar{x}$	σ
M1	4.50	4.02	4.26	0.34
M2	4.03	4.55	4.29	0.37
M3	3.05	3.44	3.25	0.28
M4	2.65	2.19	2.42	0.33
M5	4.50	4.06	4.28	0.31
M6	3.52	3.79	3.65	0.19
M7	2.28	1.96	2.12	0.22
M8	4.27	4.50	4.38	0.17
M9	3.24	3.14	3.19	0.07
M10	2.93	2.84	2.89	0.06

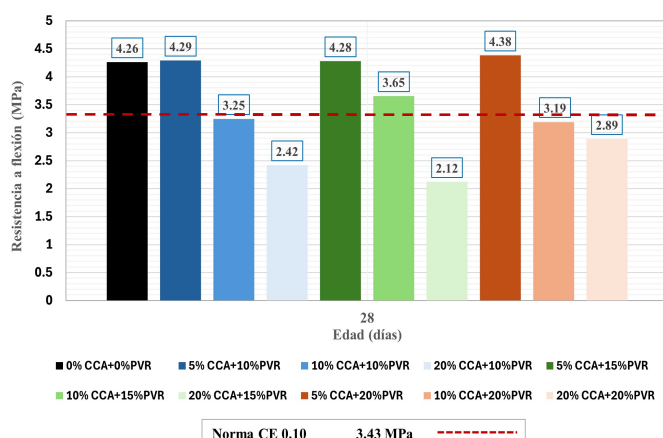


Fig. 12. Resistencia a flexión a los 28 días.

IV. DISCUSIÓN

Al analizar las pruebas físicas, la granulometría del agregado fino patrón permitió asegurar que la mezcla base cumplía con la distribución óptima para un pavimento rígido, sirviendo como referencia para evaluar el efecto de los reemplazos posteriores. Si bien este ensayo no se aplicó a las mezclas con CCA y PVR, la literatura indica que modificaciones en la curva granulométrica pueden influir directamente en la trabajabilidad y densidad del concreto, especialmente cuando se incorporan materiales finos como cenizas o polvo de vidrio [2], [7]. Por ello, la granulometría inicial constituye un punto de control indispensable para el diseño multifactorial del estudio.

Respecto a la temperatura por cada diseño, las variaciones registradas durante el mezclado evidencian la influencia composicional de la CCA y el PVR en el proceso de hidratación. La CCA, por su naturaleza puzolánica rica en sílice amorfa, suele reducir ligeramente el calor liberado en las primeras horas, como señalan Kumar et al. [1] y Reddy et al. [5]. En contraste, el PVR, al no participar químicamente en el proceso, tiende a estabilizar la temperatura, lo que coincide con lo reportado por Yupanqui [9] respecto al comportamiento térmico de concretos con vidrio reciclado. La combinación de ambos componentes favorece un sistema más estable térmicamente, condición deseable en pavimentos rígidos expuestos a gradientes térmicos significativos.

Por otro lado, en el asentamiento o slump, la disminución de la trabajabilidad observada en mezclas con mayor contenido de CCA o PVR se alinea con los mecanismos descritos previamente por la literatura. Patel [7] señala que el incremento de partículas extremadamente finas provenientes de la CCA aumenta la demanda de agua y genera mezclas menos fluidas. De igual manera, Sharma y Singh [12] atribuyen la pérdida de asentamiento con PVR a la angularidad y rigidez de sus partículas, lo cual incrementa la fricción interna. Esto permite interpretar que, al combinar ambos materiales, la mezcla requiere un control cuidadoso de la dosificación para evitar que la suma de sus efectos reduzca la manejabilidad del concreto fresco, aspecto clave en la colocación de pavimentos rígidos.

En relación con los ensayos mecánicos, la tendencia observada coincide ampliamente con lo señalado de la incorporación moderada de adiciones como la CCA y el PVR puede mejorar la resistencia, pero contenidos elevados generan efectos contraproducentes. Estudios como los de Kumar et al. [1] y Reddy et al. [5] explican que la CCA contribuye a la formación de geles C–S–H secundarios, densificando la matriz cementicia. De forma complementaria, Subramaniam y Sathiparan [11] indican que el polvo de vidrio finamente molido actúa como micro-relleno, mejorando la compacidad y la interacción pasta–agregado. Sin embargo, Hesami et al. [6] y Rasoul & Günzel [13] señalan que porcentajes excesivos de estos materiales provocan una acumulación de finos o partículas rígidas que afectan la cohesión interna de la mezcla. Por ello, la respuesta mecánica

de este estudio encaja con los mecanismos previamente descritos: existe un rango óptimo donde ambos materiales aportan beneficios estructurales relevantes para pavimentos rígidos, especialmente por la sinergia entre reacción puzolánica y densificación física.

Entre las limitaciones, en los ensayos físicos no se aplicó la granulometría directamente a las mezclas con CCA y PVR, lo que habría permitido observar cómo los reemplazos alteraban la distribución granular y la trabajabilidad. La medición de temperatura también se realizó solo en condiciones de laboratorio, sin considerar variaciones ambientales típicas de Lima-Este que podrían afectar el calor de hidratación. En la parte mecánica, no se incorporaron análisis microestructurales para confirmar la formación de C–S–H ni la distribución interna de vacíos, y tampoco se evaluó la durabilidad ante ciclos térmicos, agentes químicos o cargas repetitivas, aspectos clave para validar su uso en pavimentos rígidos [3], [8], [14].

Al comparar estos resultados con investigaciones anteriores, se confirma que sustituciones moderadas de CCA y PVR mejoran la resistencia y la densidad del concreto, mientras que porcentajes elevados generan efectos adversos por exceso de finos y pérdida de cohesión. Esto demuestra que el desempeño del concreto con materiales alternativos depende del equilibrio entre la actividad puzolánica y la optimización granulométrica, coherente con lo señalado en estudios previos [1]–[14]. En conjunto, estos hallazgos amplían la comprensión del uso combinado de residuos agroindustriales y urbanos en concretos estructurales, especialmente en pavimentos rígidos.

V. CONCLUSIONES

Los ensayos físicos demuestran que la incorporación de CCA y PVR modifica de manera significativa la trabajabilidad y la densidad del concreto. En la granulometría fue el factor más determinante: el agregado fino con 90.93% de arena y el grueso con 95.24% de grava aseguraron una mezcla densa y bien compactada. La temperatura del concreto se mantuvo dentro del rango óptimo, garantizando una hidratación adecuada, el asentamiento disminuyó progresivamente a medida que aumentaron los porcentajes de reemplazo, evidenciando una reducción en la fluidez atribuida a la mayor demanda de agua generada por las partículas finas de la CCA y a la textura angular del PVR. A pesar de ello, las mezclas mantuvieron una consistencia manejable dentro de los rangos admisibles para pavimentos rígidos, destacando que las combinaciones con 5 % y 10 % de CCA mostraron comportamientos más estables.

En cuanto a la resistencia a la compresión, los resultados mostraron que varias formulaciones superaron la resistencia mínima exigida por la Norma CE.010 (27.46 MPa). Particularmente, la mezcla 5CCA + 20PVR alcanzó 30.35 MPa, lo que representa un incremento del 10.50 % respecto al límite normativo, constituyéndose en el mayor valor registrado. Asimismo, las mezclas 5CCA + 10PVR (8.37 %) y

5CCA + 15PVR (3.37 %) también evidenciaron mejoras relevantes.

Los ensayos de resistencia a la flexión reafirmaron el comportamiento favorable de las sustituciones moderadas. Varias mezclas superaron ampliamente el valor mínimo normativo de 3.43 MPa, destacando nuevamente la combinación 5 % CCA + 20 % PVR, que alcanzó 4.38 MPa, equivalente a un incremento del 27.71 %. De igual forma, las mezclas 5 % CCA + 10 % PVR (25 %), 5 % CCA + 15 % PVR (24.71 %) y 10 % CCA + 15 % PVR (6.43 %) también superaron el umbral requerido.

El análisis conjunto de las propiedades físicas y mecánicas muestra que las sustituciones moderadas especialmente 5 % de CCA y 20 % de PVR ofrecen el mejor balance entre trabajabilidad, densidad y capacidad estructural. Esta combinación mejoró la resistencia a compresión y flexión sin afectar la consistencia de la mezcla, gracias a la acción puzolánica de la CCA y al microrelleno del PVR, lo que optimizó la formación de C–S–H y la compactación interna. En contraste, reemplazos altos (≥ 20 % CCA) reducen el desempeño, evidenciando un límite óptimo que no debe superarse para evitar pérdida de cohesión y disminución de resistencia.

Los hallazgos muestran la contribución a la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales y urbanos. Se sugiere que futuros estudios realicen análisis microestructurales, ensayos de durabilidad acelerada y evaluaciones en condiciones reales de tráfico para consolidar la aplicación de estos materiales en obras civiles permanentes.

REFERENCIAS

- [1] P. P. S. Kumar, M. S. Asha, and A. Raj, "Utilizing Rice Husk Ash as Cement Replacement in Pervious Concrete," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 41–48, 2020, doi: 10.29121/ijesrt.v9.i10.2020.4.
- [2] Y. C. Coronel Sánchez, L. F. Altamirano Tocco, and S. P. Muñoz Pérez, "Cenizas y fibras utilizadas en la elaboración de concreto ecológico: una revisión de la literatura," *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 25, no. 49, pp. 321–329, Jun. 2022, doi: 10.15381/iigeo.v25i49.20814.
- [3] Y. M. Rosales Villanueva and M. I. Laurencio Luna, "Resistencia y beneficios ambientales de cenizas agrícolas y fibras naturales en el concreto," *Revista Científica Pakamuros*, vol. 13, no. 2, pp. 122–137, Jun. 2025, doi: 10.37787/mv6d2q17.
- [4] S. A. Endale, W. Z. Taffese, D.-H. Vo, and M. D. Yehualaw, "Rice Husk Ash in Concrete," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 137, Dec. 2022, doi: 10.3390/su15010137.
- [5] K. Rajashekhar Reddy, M. Harihanandh, and K. Murali, "Strength performance of high-grade concrete using rice husk ash (RHA) as cement replacement material," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 8822–8825, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.332.
- [6] S. Hesami, S. Ahmadi, and M. Nematzadeh, "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 53, no. 53, pp. 680–691, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070.
- [7] S. Sathe, M. Zain Kangda, and S. Dandin, "An experimental study on rice husk ash concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 77, pp. 724–728, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.366.
- [8] M. Harihanandh and K. Rajashekhar Reddy, "Study on durability of concrete by using rice husk as partial replacement of cement," *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, pp. 1794–1799, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.448.

- [9] M. N. Bedriñana Garamendi and R. R. Yoctun Rios, "Influencia del vidrio reciclado en las propiedades mecánicas del concreto autocompactante y la capacidad de uso en la ciudad de Ayacucho," *Gaceta Técnica*, vol. 25, no. 2, pp. 74–89, Jun. 2024, doi: 10.51372/gacetatecnica252.5.
- [10] A. İ. Çelik et al., "Mechanical Behavior of Crushed Waste Glass as Replacement of Aggregates," *Materials*, vol. 15, no. 22, p. 8093, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15228093.
- [11] A. Subramaniam, S. Shanavas, K. Shanmugam, A. L. R. A. Raj, S. Ramasamy, and A. Gururajan, "Influence of Glass Powder in strength and durability performance of Sisal Fiber Reinforced Concrete," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 29, no. 4, Jan. 2024, doi: 10.1590/1517-7076-rmat-2024-0674.
- [12] S. Sharma and R. Singh, "Studies on Properties of Concrete with Fluorescent Waste Glass Powder," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 11, pp. 1780–1787, 2013.
- [13] U. Jhakar, S. Thakur, and S. Jain, "Analyzing the impact of recycled aggregate and waste glass powder on the fresh and mechanical properties of concrete," *Environment Conservation Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 1059–1070, Nov. 2024, doi: 10.36953/ecj.28142861.
- [14] Norma Técnica Peruana 400.012. (2013). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso global*. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-INDECOPI
- [15] D.-J. Lee, S.-W. Kim, K.-M. Kim, M.-S. Go, and J.-S. Kim, "Material Properties of Mortar Using Recycled Glass Fiber-Reinforced Plastic Powder," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, vol. 11, no. 5, pp. 8–14, Oct. 2020, doi: 10.11004/kosacs.2020.11.5.008.
- [16] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 400.037:2014. Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto.*, Lima, Perú: INACAL, 2014.
- [17] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 400.037:2018. Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto.*, Lima, Perú: INACAL, 2018.
- [18] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.009:2020. Cemento Portland. Requisitos.*, Lima, Perú: INACAL, 2020.
- [19] UNACEM Perú, "Productos y servicios – Comercialización," UNACEM, 08 Feb. 2024. <https://unacem.pe/comercializacion/productos-y-servicios/productos/>
- [20] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.088:2014. Agua para amasado del concreto. Requisitos.*, Lima, Perú: INACAL, 2014.
- [21] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.090:2016. Cemento Portland. Determinación de la finura por el método de permeabilidad al aire (Método de Blaine)*, Lima, Perú: INACAL, 2016.
- [22] ACI Committee 211, *ACI 211.1-22: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal-Density Concrete*, American Concrete Institute, 2022.
- [23] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, *Norma Técnica CE.010: Pavimentos Urbanos*, Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), Perú, 2016.
- [24] NTP 339.034:2021, *Concreto — Elaboración y curado de probetas de concreto en laboratorio*, Instituto Nacional de Calidad (INACAL), Perú, 2021.
- [25] NTP 339.035, "Concreto: método de ensayo para la medición del asentamiento", INACAL, Lima, Perú, 2009.
- [26] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.184:2014. Concreto. Determinación de la temperatura del concreto fresco (ASTM C1064)*, Lima, Perú: INACAL, 2014.
- [27] NTP 339.034, "Concreto: determinación de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados", INACAL, Lima, Perú, 2008.
- [28] NTP 339.083, "Concreto: método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión (ensayo de tercer punto)", INACAL, Lima, Perú, 2005.