

Performance Optimization of Pervious Concrete for Pavements Using Treated Recycled Aggregates and Cement Replacement with Silica Fume

Clariza Lizbeth Cubas Oliva¹; Brizeth Mabel Pilar Hilario²; Nayda Susana Morales Galiano³

^{1,2}Peruvian University of Applied Sciences, Lima, Perú, u20201b364@upc.edu.pe, u20201b381@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Lima, Perú, pccinmor@upd.edu.pe

Abstract– *This study evaluates the influence of the mineral addition of microsilice as a partial binder replacement, in combination with the partial substitution of natural aggregates with treated recycled concrete aggregate (TRCA). This process aims to optimize the performance of pervious concrete to mitigate the loss of compressive strength in rigid pavement under rainy conditions while promoting the recycling of old concrete. Natural aggregates were partially replaced by TRCA at a 25% ratio, and cement was replaced with silica fume at concentrations of 0%, 5%, and 7%. Four mixtures were prepared following the ACI 522R-10 standard, with final results showing compressive strengths ranging from 15 to 23 MPa, meeting the requirements of the CE.010 standard. Infiltration rates ranged from 0.84 to 1.19 cm/s, within the allowable range. It is concluded that the use of TRCA along with silica fume improves compressive strength, although it reduces the infiltration rate due to decreased porosity.*

Keywords– *Pervious concrete, Recycled coarse aggregate, Grout treatment, Compressive strength, Permeability, Silica fume.*

Optimización del desempeño de concretos permeables para pavimentos mediante agregado reciclado tratado y reemplazo de cemento por humo de sílice

Clariza Lizbeth Cubas Oliva¹; Brizeth Mabel Pilar Hilario²; Nayda Susana Morales Galiano³
^{1,2}Peruvian University of Applied Sciences, Lima, Perú, u20201b364@upc.edu.pe, u20201b381@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Lima, Perú, pccinmor@upd.edu.pe

Resumen— Este estudio evalúa la influencia de la adición mineral de microsilice como reemplazo parcial del aglutinante, en combinación con la sustitución parcial de los agregados naturales por agregado de concreto reciclado tratado (ACRT). Dicho proceso está orientado en la optimización del desempeño de concretos permeables con la finalidad de mitigar la pérdida de resistencia a compresión del pavimento rígido bajo condiciones de lluvia además de incentivar el reciclaje de concreto viejo. Se reemplazaron parcialmente los agregados naturales por ACRT en un 25 % y el cemento por humo de sílice en concentraciones del 0 %, 5 % y 7 %. Las cuatro variaciones fueron elaboradas siguiendo la norma ACI 522R-10, cuyos resultados finales mostraron resistencias a compresión entre 15 y 23 MPa, cumpliendo con los requisitos de la norma CE.010. Las tasas de infiltración oscilaron entre 0,84 y 1,19 cm/s, dentro del rango permitido. Se concluye que el uso de ACRT junto con humo de sílice mejora la resistencia a compresión, aunque disminuye la tasa de infiltración debido a la reducción de la porosidad.

Palabras claves—concreto permeable, agregado grueso reciclado, tratamiento con lechada, resistencia a compresión, permeabilidad, humo de sílice.

I. INTRODUCCIÓN

El mundo contemporáneo actual avanza constantemente en diversos sectores especialmente en la industria de la construcción [1]. Dicho proceso trae consigo el crecimiento exponencial de los residuos de construcción que los procesos de urbanización implican [2]. Como resultado, únicamente por año, se ha registrado a nivel mundial una cantidad de 17 mil millones de toneladas, proyectando para el año 2050, un aumento notable a 25 mil millones de toneladas [3]. Como es evidente, la demanda por nueva infraestructura equivale también a la demolición de edificaciones considerablemente antiguas, lo que termina en las grandes cantidades de contaminantes producidos como desechos [4]. En consecuencia, al presente panorama, donde la sobreexplotación de recursos naturales anexado a la mala gestión de desechos de construcción obliga a proponer opciones ecológicas para dar una nueva finalidad a todos aquellos residuos generados [5]. Al ser el concreto el principal material empleado en las edificaciones, también denota que por su alta demanda termina convirtiéndose en el principal residuo contaminante [6]. Es así como surge la alternativa del reciclaje, precisamente enfocada en su reutilización al convertirlo en agregado grueso. Esta medida reemplazaría la piedra natural, pero también implica una reducción marcada de las propiedades mecánicas, lo que limita sus aplicaciones [7]. [8]. Una de ellas y la más innovadora identificada a lo largo de los años, es su uso en la creación de pavimentos

rígidos permeables. Al seguir este enfoque de infraestructura verde, los concretos permeables como parte de diversas vías de tránsito promocionan una mejora sustancial en la gestión de agua pluviales debido a la común escasez de drenajes adecuados en áreas urbanas densas [9]. Es entonces que, para disminuir esta impermeabilidad de los suelos, la escorrentía y además por el progreso de las condiciones de transitabilidad y el aumento de la capacidad de filtración, se resalta la solución prometedora de la elaboración de un concreto permeable (CP), pero con agregado de concreto reciclado (ACR) [10]. Sin embargo, al emplearse ACR también se debe considerar su análisis de efectividad, ya que la proyección de vida útil del nuevo diseño se reduciría debido a su composición, limitando sus propiedades mecánicas como su desempeño a compresión, reduciendo así la promoción de su uso [11]. Es entonces que el desafío representa encontrar el equilibrio entre mejorar el comportamiento mecánico de un concreto permeable con ACR mientras mantiene su capacidad de filtración. Absolver este problema, puede determinar el modelo propuesto como una práctica sostenible además de replicable en diversas aplicaciones viales [12].

De acuerdo con la revisión de la literatura, el CP con ACR presenta oportunidades interesantes para el desarrollo de materiales sostenibles, sin embargo, uno de los principales retos al emplear ACR es su alto porcentaje de absorción de agua, el cual afecta negativamente las propiedades mecánicas del concreto. Para mitigar este efecto, se han desarrollado tratamientos que fortalecen la superficie de los ACR. Por ejemplo, sumergir el ACR en lechada de cemento durante cinco minutos y dejarlo secar a temperatura de ambiente (20°C) durante tres días mejora significativamente su comportamiento, ya que permite incrementar su resistencia a compresión, alcanzando valores de 35,1 MPa en comparación con los 24,2 MPa obtenidos con ACR sin tratar [13].

Además de ello, es fundamental tener en cuenta la proporción adecuada de reemplazo de los agregados naturales por ACR para garantizar un buen desempeño. Estudios indican que un reemplazo parcial, en rangos entre el 20 % y 60 %, resulta óptimo, logrando resistencias de hasta 20 MPa y una permeabilidad de 6 mm/s. Mientras que, al emplear ACR como único agregado, el CP sufre una reducción significativa en resistencia a compresión llegando apenas 11,53 MPa a los 28 días, con una permeabilidad de 1,05 cm/s [12]. Ello pone de manifiesto la importancia de ajustar las proporciones de los componentes del CP para obtener un balance entre resistencia y permeabilidad.

Otro aspecto clave para mejorar las propiedades del CP, es el uso de adiciones como el humo de sílice, que en reemplazo parcial del aglutinante y en proporciones controladas, entre 3 % y 7%, proporciona una mejor resistencia a compresión del concreto. Frente a ello, es importante recalcar que su bajo porcentaje de uso tiene la finalidad de evitar la obstrucción de poros del CP, afectando su capacidad de filtración [14]. En el mismo contexto, la baja fluidez característica del CP puede ser mejorada mediante aditivos reductores de agua en proporciones del 0,25 %, facilitando la trabajabilidad de la mezcla sin afectar su estructura porosa [15].

Por último, la relación agua-cemento también juega un rol determinante en el desempeño general del CP. Se ha encontrado que mantener una relación a/c entre 0,30 y 0,35 proporciona una combinación favorable de resistencia mecánica y permeabilidad [9]. Es así como las consideraciones expuestas permiten desarrollar mezclas de CP con ACR que no solo cumplen los requisitos técnicos, sino que también promueven la sostenibilidad mediante la reutilización de materiales reciclados en la construcción.

La propuesta de este artículo científico es el desarrollo investigativo de optimización del desempeño a compresión del concreto permeable mientras se evalúa la influencia de reemplazo en un 25 % de agregado de concreto tratado en lechada de cemento y con el reemplazo del aglutinante por humo de sílice en proporciones de 0 %, 5 % y 7 %. Ello con la finalidad de obtener mejores parámetros de respuesta mecánica manteniendo la permeabilidad en los rangos adecuados de 0,2 y 0,54 cm/s además de demostrar el beneficio orientado en su aplicación en vías de tránsito.

Este análisis investigativo tiene como aporte una contribución relevante en el desarrollo de infraestructuras sostenibles en áreas urbanas especialmente para lugares que presentan precipitaciones de volúmenes significativos siendo áreas grises y donde el control de escorrentía es crucial para reducir estancamientos [1]. Asimismo, un objetivo es demostrar la efectividad del concreto permeable con ACRT y reemplazo de humo de sílice. Dicha información contribuirá a establecer lineamientos técnicos de diseño que, paralelamente promuevan el uso eficiente de los residuos al convertirlos en agregados de concreto reciclado, mismo que acompañados del tratamiento, permitirán mejorar las propiedades mecánicas del concreto en el que se usen mientras no disminuye su calidad final. Es así como los resultados proporcionaran evidencias y precedentes suficiente para crear nueva infraestructura ambientalmente beneficioso y lo duradero en términos de desempeño mecánico [13].

II. CONTENIDO

A. MATERIALES

Todos los materiales utilizados fueron seleccionados a partir de una evaluación de sus propiedades y su alineamiento con los requisitos propuestos para esta investigación. A continuación, se describen los materiales seleccionados para este estudio:

- i) **Cemento:** Se utilizó Cemento Portland Tipo I siguiendo las normas NTP 334.009 “Cementos Portland Requisitos” [16] y ASTM C-150 [17] “Especificación Normalizada para Cemento Portland”.

La **Tabla I** muestra las principales propiedades químicas del cemento empleado en la presente investigación.

TABLA I

RESUMEN DE PROPIEDADES DEL CEMENTO TIPO I

Propiedades		
Descripción	Límites	Método ISO
SiO%	98	287/11
Densidad (g/ml.) Máx	160	287/12
PH (5g 100 ml H2O) %	6.0-7.0	787/9
Absorción de Aceite D.B.P.	280-300	ASTM/D2414/65T
Perdidas por ignición 1050 C (%) 4-6		3262/17
Perdidas por humedad a 105C (%) 3-6		

- ii) **Humo de sílice:** Este material puzolánico altamente reactivo fue utilizado como reemplazo parcial del cemento en porcentajes variables de 0 %, 5 %, y 7%. Su rango de tamaño de partícula fue de 0,15 µm y según las propiedades descritas en la **Tabla II** cumple con los requisitos de uso impuesto por la norma ASTM C-204 [18]. La microsílíce debido a su composición tendrá una reacción con el cemento que permitirá la formación de un compuesto denominado silicato de calcio, el cual mejora directamente la resistencia del concreto resultante.

TABLA II

RESUMEN DE PROPIEDADES DE MICROSILICE

Parámetro	Unidad	Cemento
Contenido de aire	%	7
Expansión autoclave	%	0.09
Superficie específica	m ² /kg	323
Densidad	g/cm ³	3.13
MgO	%	2.9
SO ₃	%	2.8
Pérdida al fuego	%	2.2
Residuo insoluble	%	0.9

- iii) **Agregado fino:** Este agregado fue proveniente del Laboratorio de Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Gracias a los ensayos se comprobó su cumplimiento con los requisitos técnicos que se describen en la NTP 400.037 Requisitos agregados de concreto [19]. Según los ensayos de granulometría y sus porcentajes pasantes se obtuvieron que su módulo de fineza fue de 3,24. Dicho parámetro indica que la arena con la que se trabajó es más gruesa, lo que contribuirá a la porosidad en el diseño de concreto permeable a desarrollar. Se muestra su distribución granulométrica en su curva granulométrica visualizada en el **Fig. 1**.

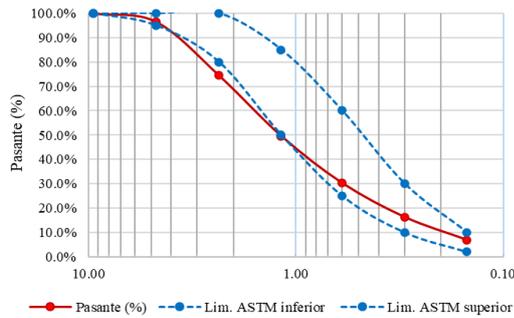


Fig. 1. Curva granulométrica del agregado fino

- iv) **Agregado grueso:** De igual manera, el agregado grueso empleado fue proporcionado por el Laboratorio de la UPC. Y de acuerdo con su granulometría el Huso al que pertenecen es el 67, en la Fig. 2, se observa la distribución de los pasantes en la curva granulométrica.

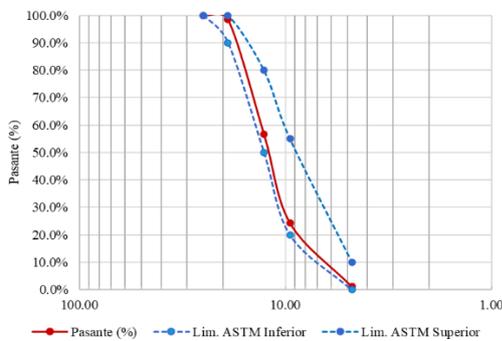


Fig. 2. Curva granulométrica del agregado grueso

- v) **Agregado grueso de concreto reciclado (AGCR):** El agregado reciclado fue proveniente de una caja ecológica cuyo proceso fue la trituración de concreto reciclado provenientes de postes de alumbrado público con una resistencia original de hasta 35 MPa según lo especifica la NTP 339.027 [20]. Su curva granulométrica se muestra en la Fig. 3.

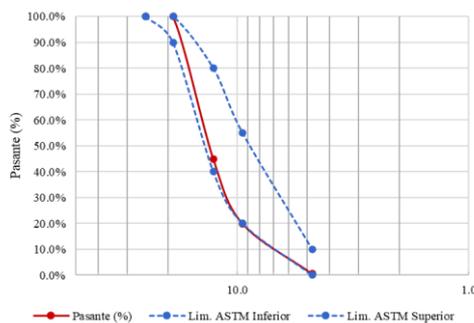


Fig. 3. Curva granulométrica del agregado grueso de concreto reciclado.

- vi) **Aditivo:** Se seleccionó un aditivo plastificante, el cual tiene propiedades de reducción de agua de hasta un 10 % aumentando así la trabajabilidad de las muestras sin afectar su relación a/c. Asimismo, el material cumple con los requerimientos de la norma ASTM C-494 tipo A [21]. En la Tabla III se muestran los datos técnicos del aditivo empleado.

TABLA III.

PROPIEDADES DEL ADITIVO PLASTIFICANTE

Datos técnicos	Aditivo
Apariencia	Líquido
Color	Marrón oscuro
Densidad	1.2 g/ml ± 0.06
pH	9.00-12.50
VOC	0 g/L

Se presenta a continuación en la Tabla IV el resumen de las principales propiedades de los agregados empleados como parte de los diseños analizados en este artículo.

TABLA IV

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO

Propiedades	Agregado fino	Agregado grueso natural	A.C. Reciclado	A.C.R. tratado
Tamaño de agregado (mm)	0.15-4.75	4.75-19	4.75-12.7	4.75-12.7
Huso	-	67	67	67
Peso Específico aparente (g/cm ³)	2.68	2.92	2.69	2.62
Peso Específico (g/cm ³)	2.62	2.77	2.29	2.29
Absorción de agua (%)	0.85	1.88	6.48	5.48%
Contenido de humedad (%)	1.49	0.94	1.61	3.48

B. PROPORCIONES DE MEZCLA

La proporción de mezcla del concreto permeable fue diseñada para cumplir con los requisitos del ACI 522R-10: "Report on Pervious Concrete" [22], donde se muestran las definiciones y rangos de valores claves de resistencia a la compresión y permeabilidad que debe tener un concreto permeable. De igual forma, para realizar el diseño se siguió el Anexo 6 de la normativa 211.3R-02: "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete" [23] donde se redactan consideraciones y proporciones requeridas. Para esta investigación se mantuvo un valor constante de relación a/c de 0,3 en todas las variaciones de diseño. En total se trabajaron 4 diseños distintos. El primero es la mezcla de control, compuesta por 100 % de agregado natural, usando el aditivo, pero sin reemplazos de humo de sílice. Los posteriores 3 diseños, tuvieron un reemplazo de 25 % del agregado natural por agregado reciclado tratado y emplearon variaciones de 0 %, 5 % y 7 % de humo de sílice por cemento. Es así como posterior a usar la información obtenida de los ensayos de agregado se obtuvieron las proporciones mostradas en la Tabla V según cada variación por m³.

TABLA V

PROPORCIONES DE MEZCLA POR M³ PARA CONCRETO PERMEABLE

Diseños	Cantidades por m ³			
	100% AN	25% AR-0% HS	25%AR-5% HS	25%AR-7% HS
Materiales	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)
Agua	154.482	152.414	154.482	154.482
Humo de Sílice	28.057	0	22.998	28.057
Cemento	431.902	466.292	436.961	431.902
A.G.N	1062.761	1417.015	1062.761	1062.761
A.G.C.R.T.	375.995	0	375.995	375.995
A.F.	106.147	106.147	106.147	106.147
Aditivos	5.596	5.596	5.596	5.596

C. METODOLOGÍA

1) Tratamiento de los agregados de concreto reciclado

Para continuar con los diseños, es importante describir el proceso de tratamiento de los agregados de concreto reciclado. La Ref. [13] fue utilizada como guía para la metodología propuesta.

i. Evaluación y pesaje del agregado reciclado:

Inicialmente, se determinó la cantidad requerida para los ensayos propuestos, teniendo en consideración que se realizará un reemplazo de 25 % por agregados de concreto reciclado, es así como se pesaron 156 kilos de agregado reciclado a tratar.

ii. Proporción de la lechada de cemento:

Teniendo las cantidades, se procedió a tomar las proporciones de la lechada de cemento, siguiendo una relación de 20 % de cemento por cada 4 litros de agua, dichas cantidades fueron resumidas como funcionales de forma que el tratamiento cumpla con las indicaciones redactadas por los autores previamente descrito.

iii. Mezcla inicial:

Para continuar, utilizando un trompo mezclador de 5 pies cúbicos, se mezcla una porción de 52 kilos de ACR con 8 litros de agua y 1,6 kilos de cemento Tipo I. Primero, se añade el agregado, seguido por el agua y, tras 20 segundos de mezcla, se incorpora el cemento. La mezcla se realiza durante 5 minutos para asegurar una integración homogénea.

iv. Distribución en baldes:

La mezcla se transfiere a baldes de 20 litros, añadiendo la lechada de cemento hasta cubrir completamente el agregado. Este proceso se repite para todos los 52 kilos de ACR en varios baldes.

v. Secado inicial:

Tras 15 minutos de reposo, se escurre el ACR y se coloca sobre un plástico extendido en el suelo, asegurando que el agregado esté bien distribuido para evitar charcos de cemento y lograr un secado uniforme.

vi. Secado controlado:

El ACR se deja secar durante 3 días a una temperatura de entre 20 °C y 21 °C, proceso que sella los poros, reduciendo la absorción de agua en comparación con el agregado sin tratar.

vii. Tamizado y almacenado final: Una vez completado el secado, el agregado se tamiza con una malla N°4 para eliminar partículas finas que puedan interferir con su resistencia. Se realiza un tamizado cuidadoso para evitar daños en la capa protectora formada. Finalmente, el ACR se almacena en sacos a la misma temperatura hasta su próximo uso.

2) Elaboración del concreto permeable

Para la mezcla del concreto permeable, se utilizó una mezcladora de 5 pies cúbicos de capacidad. El proceso comenzó añadiendo los agregados gruesos naturales en la mezcladora junto con el 60 % del agua total durante un minuto. Posteriormente, se añade los agregados de concreto reciclado por dos minutos adicionales.

Luego, se incorpora el cemento, arena y el humo de sílice, mezclándose por un minuto.

Finalmente, se agrega el aditivo plastificante diluido en el agua restante por dos minutos más. [24]

3) Ensayos en concreto fresco

Después de retirar la mezcla de concreto permeable se proceden a realizar los siguientes ensayos:

- i. **Peso Unitario y contenido de vacíos:** Se llevó a cabo ensayos de peso unitario (P.U.) siguiendo los procedimientos redactados en la NTP. 400.017: “Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto)” [25]. Asimismo, para el cálculo del contenido de vacíos, se emplearon los valores de peso unitario y de la densidad teórica (DT), misma que se obtiene mediante la división de la masa de los materiales utilizados por probeta sobre su volumen. Finalmente, reemplazando los valores en se obtuvo el porcentaje de vacíos usando (1).

$$\% V = \frac{PU - DT}{PU} \times 100 \dots \dots (1)$$

Donde: PU representa el peso unitario de la muestra (kg/m³) y DT representa el valor de densidad teórica de la muestra calculada en kg/m³, % V representa porcentaje de vacíos final de la muestra.

4) Muestreo y desmolde de probetas y vigas

Para realizar los ensayos en concreto endurecido, se extrajeron muestras de concreto permeable en forma de probetas cilíndricas de 4 x 8” y vigas en moldes de 15 x 15 x 40 cm, garantizando un minucioso cuidado para evitar dañarlas y conservar su integridad para las pruebas posteriores.

5) Curado de vigas y probetas

Se trasladaron las probetas y vigas a una cámara de curado de 2m x 2m. Las muestras se curaron en condiciones controladas de humedad y temperatura durante el tiempo necesario para evaluarlas en diferentes edades en ensayos correspondientes.

6) Ensayos en concreto endurecido

ii. Resistencia a compresión:

Se analizó la resistencia a compresión a los 7, 14, 28 y 56 días para las cuatro variaciones de concreto permeable, considerando el procedimiento de acuerdo con la NTP 334.051 [26]. Dicha resistencia se puede obtener utilizando (2).

$$f_c = \frac{P}{A} \dots \dots (2)$$

Donde: f_c es la resistencia a la compresión en MPa, P es la carga que la muestra puede soportar antes de que comience a romperse, en kN, y A es el área de la muestra en mm^2 .

iii. Resistencia a flexión:

Se realizaron los ensayos de resistencia a la flexión en muestras de vigas de (15 x 15 x 40 cm) después de 28 días de acuerdo con ASTM C293 [27] y se determinó utilizando (3).

$$R = \frac{P.L}{2.b.d^2} \dots \dots (3)$$

Donde: R es el módulo de ruptura (PSI o MPa), P es la carga máxima aplicada indicada por la máquina de prueba (lbf o N), L es la longitud del tramo (mm), b es el ancho promedio de la muestra en la fractura (mm) y d = profundidad promedio de la muestra, en la fractura, pulg. o mm.

iv. Capacidad de infiltración:

La permeabilidad del concreto se determinó utilizando un permeámetro casero como se observa en la Fig. 4, recomendado por el ACI 522-R10 [22] utilizando la ecuación de Darcy (4).

$$K = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \cdot \frac{L}{t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \dots (4)$$

Donde: K representa la permeabilidad o conductividad hidráulica, y A_1 representa el área de la sección transversal del tubo de cabecera, A_2 representa el área de la sección transversal de la muestra, L representa la longitud de la muestra y 't' representa el tiempo desde la cabecera (h_1) hasta la cabecera (h_2).



Fig. 4. Permeámetro casero elaborado de acuerdo con el ACI 522R-10

III. RESULTADOS

A. Peso Unitario y Contenido de vacíos.

De los ensayos se obtuvieron valores de Peso unitario desde los 1939,31 kg/m^3 para la muestra con agregado tratado en reemplazo de 25 % (reemplazo constante) sin humo de sílice (CR0). Seguidamente, la muestra con 25 % de reemplazo con agregado tratado y 5 % de humo de sílice (CR5) obtuvo un valor de 1997,11 kg/m^3 ; continuando, le sigue la muestra con 100 % de agregado natural y 0 % (CN0) sílice. Finalmente, la muestra que obtuvo el mayor valor de peso unitario de 2115,61 kg/m^3 fue la que usó el reemplazo de 25 % de agregado tratado con un reemplazo de aglomerante de 7 % por humo de sílice (CR7). Asimismo, se procede al cálculo de las densidades teóricas según la cantidad real de materiales empleados en peso (kg) y por volumen (m^3) clasificándolo según el tipo de muestra cómo se puede ver en la Fig. 5 como resumen.

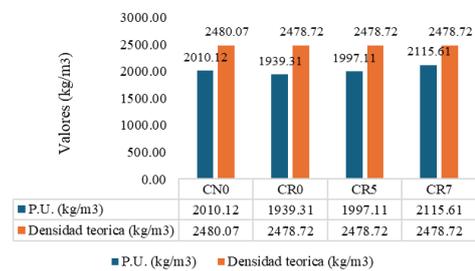


Fig. 5. Resumen de valores entre peso unitario calculado y densidad teórica

De los valores anteriores también se calculó el contenido de vacíos obteniendo valores con un rango entre 15 % hasta 22 % de la muestra más permeable. Este último valor obtenido del diseño con agregado tratado al 25 % sin humo de sílice. Seguidamente la muestra con 25 % AR tratado con 5 % de humo de sílice y la muestra modelo con agregado natural obtuvieron el mismo porcentaje de vacíos con un 19 %. Para finalizar el diseño con menor porcentaje de vacíos fue el que implementó 7 % de humo de sílice como aglomerante llegando únicamente a 15 %. Para la mejor visualización de los resultados se presenta graficado en la Fig. 6.

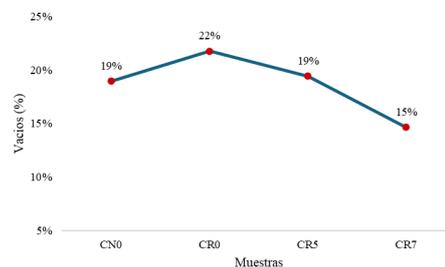


Fig. 6. Valores obtenidos del porcentaje de vacíos de los diversos diseños

B. Resistencia a compresión

Los ensayos a compresión fueron realizados cada 7, 14 y 28 días, en la Fig. 7 se pueden visualizar los resultados de las 4 variaciones ensayas. El concreto patrón con un 100 % de agregado natural alcanzó a los 7 días un 73 % de la resistencia

requerida para concretos aplicados en vías de tránsito [28], continuando en 14 días llegó a 106 % y a los 28 días como fue visualizado alcanzó una resistencia de 124 % llegando a alcanzar los 21,63 MPa. Respecto a la primera variación realizada con 25 % de ACR tratado y 0 % de sílice, los resultados demostraron que a los 7 días el porcentaje de resistencia requerida fue de 66 %, a 14 días únicamente había alcanzado un 66 % de la resistencia requerida, valor que incrementó a 87 % a los 28 días, pero igualmente sin llegar al mínimo. El desempeño de la variación con un reemplazo de 5 % de humo de sílice tuvo un comportamiento inferior a los 7 días ya que únicamente alcanzó 51 % de lo requerido. Sin embargo, a los 14 días si alcanzó un valor superior a su predecesor, llegando a los 13,42 MPa, lo que significó llegar a un 77 % de lo requerido. Igualmente, a los 28 días, si logró llegar a superar el 100 %, llegando a un valor de 19,10 MPa equivalente a un 109 %. Finalmente, los resultados con reemplazo de 7 % de sílice incrementaron considerablemente los valores de resistencia, alcanzando 81 % de lo mínimo requerido a los 7 días, seguido de 100 % a los 14 días y posteriormente incrementando hasta los 22,53 MPa a los 28 días lo que significó el 129 %.

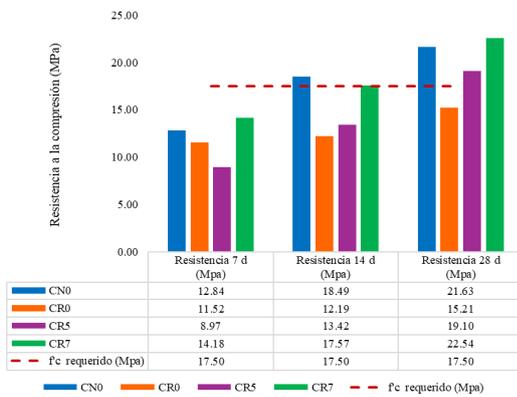


Fig. 7. Resumen de los valores obtenidos a compresión en 7, 14 y 28 días.

C. Resistencia a flexión

En la Fig. 8 se puede visualizar los resultados calculados según los ensayos realizados a los 28 días de las diferentes variaciones. De los ensayos, se sabe que las fallas en las vigas fueron ubicadas en los centros y que los resultados se mantuvieron superiores al 10 % del valor calculado a compresión. El concreto con ACR tratado sin sílice obtuvo el menor valor de 1,93 MPa, seguido del concreto con reemplazo de 7 % humo de sílice el cual llegó a 2,73 MPa.

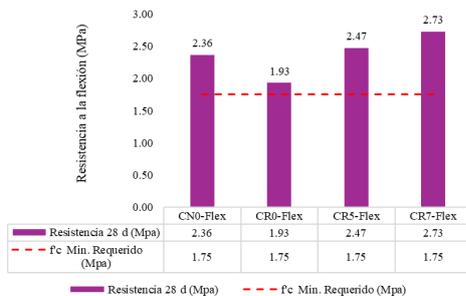


Fig. 8. Resumen de valores de resistencia a flexión a 28 días

D. Permeabilidad.

La permeabilidad medida a los 28 días con un permeámetro siguiendo una altura h_1 inicial de 30 cm y h_2 de 1,5 cm, valor estipulado en la norma ACI 522R [22] en el diseño de las alturas del agua aplicable. El valor más inferior de permeabilidad fue de 0,84 cm/s por parte del diseño con un reemplazo de 7 % de sílice y el mejor valor se consiguió con el ACR tratado, pero sin la participación del humo sílice, el cual alcanzó 1,19 cm/s. Los resultados graficados se pueden visualizar en la Fig. 9.

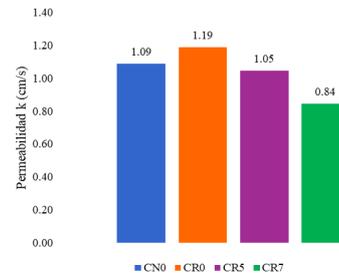


Fig. 9. Valores de coeficientes de permeabilidad obtenidos.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis de Peso Unitario vs % de vacíos

Como se observa en la Fig. 10, la mezcla base combina un peso unitario elevado con vacíos moderados, proporcionando resistencia adecuada y permeabilidad balanceada, ideal para aplicaciones estructurales. En la mezcla CR0, el uso de agregados reciclados reduce el peso unitario al menor valor de todas las muestras: 1939,31 kg/m³, asimismo, aumenta los vacíos a 22 %, mejorando la permeabilidad a costa de una ligera disminución en la resistencia. Este comportamiento depende de la calidad y el tratamiento de los agregados reciclados, que afectan la uniformidad del concreto, mientras que la mezcla CR5, con humo de sílice, incrementa el peso unitario a 1997,11 kg/m³ y densifica la matriz, mejorando la resistencia y durabilidad al cerrar vías de penetración de agentes químicos, sin reducir significativamente los vacíos con 19 %. La mezcla CR7, con mayor proporción de humo de sílice, ofrece máxima resistencia, pero sacrifica permeabilidad, lo que limita su uso en sistemas donde el drenaje es críticos. Sus valores opuestos residen en 15 % de cantidad de vacíos y el mayor peso unitario de todas las muestras con 2115,61 kg/m³. En síntesis, las mezclas con mayor densidad y menos vacíos son ideales para cargas altas, mientras que las de menor densidad y más vacíos priorizan la capacidad de drenaje. La selección depende del balance requerido entre resistencia, permeabilidad y durabilidad.

En conclusión, las mezclas con mayor peso unitario y menor porcentaje de vacíos ofrecen una resistencia estructural superior, siendo ideales para soportar cargas sustanciales en aplicaciones de alta demanda. Por otro lado, las mezclas con menor peso unitario y un mayor porcentaje de vacíos favorecen la permeabilidad, adaptándose mejor a sistemas donde el drenaje es prioritario. La elección de la mezcla adecuada dependerá de equilibrar estas propiedades según las necesidades específicas de cada aplicación, considerando también aspectos como la durabilidad, manejabilidad y uniformidad del concreto [29].

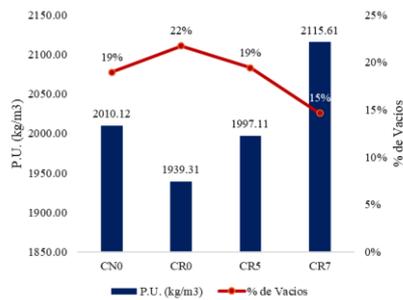


Fig. 10. Gráfico de Peso unitario vs Porcentaje de vacíos

B. Analisis de Resistencia a la compresión vs Permeabilidad

De acuerdo con el comportamiento visualizado en la Fig. 11, la resistencia a compresión mantiene una relación inversamente proporcional a los valores de permeabilidad. Dichos resultados describen el comportamiento característico de los concretos permeables, que al tener un bajo desempeño mecánico adquieren mejores valores de permeabilidad [30]. Los vacíos de cada modelo son diferentes variando en porcentajes incrementales para los que tienen mejores valores de permeabilidad. Es así como ejemplificando, la mezcla CR0, sin sílice y solo con el reemplazo de agregado reciclado, se tuvo 15,21 MPa a compresión mientras alcanzó un máximo de 1,19 cm/s en permeabilidad, el mejor valor entre todas las variantes. Contrariamente, para el diseño CR7 que fue el que obtuvo mejor desempeño a compresión superando incluso al concreto CR0 que era el patrón, su permeabilidad fue la menor del grupo, únicamente logrando 0,84 cm/s. Es importante resaltar que incluso el menor valor de permeabilidad de todos se encontró dentro del rango entre 0,14 cm/s – 1,22 cm/s de que evidencia la efectividad de filtración de todos los diseños de concreto siguiendo la investigación propuesta según ACI 522R, 2010 [22].

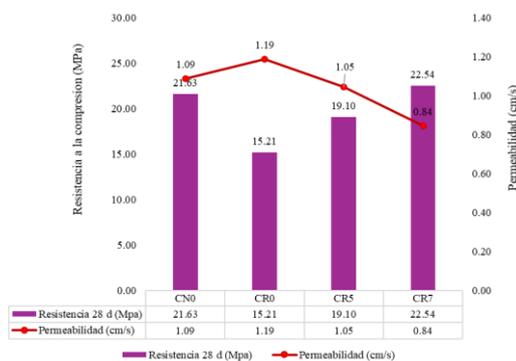


Fig. 11. Gráfico Resistencia a compresión vs Permeabilidad

C. Analisis de Resistencia a flexión vs Permeabilidad

Este análisis es esencial para aplicaciones como pavimentos permeables, donde la resistencia a flexión y la capacidad de drenaje son críticas. De acuerdo con la Fig. 12, la mezcla base (1) presenta una resistencia a flexión moderada de 2,36 MPa y una permeabilidad de 1,09 cm/s, gracias a la cohesión homogénea de los agregados naturales. En la mezcla CR0 (2), la resistencia a flexión disminuye a 1,93 MPa, mientras que la permeabilidad aumenta a 1,19 cm/s, debido a los agregados reciclados tratados. La mezcla CR5 (3) mejora la resistencia

a flexión a 2,47 MPa gracias al humo de sílice, que densifica la matriz del concreto actuando como micro-relleno. Sin embargo, esto reduce la permeabilidad a 1,05 cm/s. Por último, la mezcla CR7 (4) alcanza una resistencia a flexión máxima de 2,73 MPa, atribuida a la densificación y reacción puzolánica del humo de sílice, pero con una marcada reducción en la permeabilidad a 0,84 cm/s. Por ende, se visualiza que las mezclas con humo de sílice incrementan significativamente la resistencia a flexión, siendo ideales para soportar cargas altas reduciendo en paralelo la permeabilidad [31]. Por otro lado, las mezclas con agregados reciclados ofrecen mayor permeabilidad, adecuadas para aplicaciones donde el drenaje es prioritario y las cargas flexibles son moderadas.

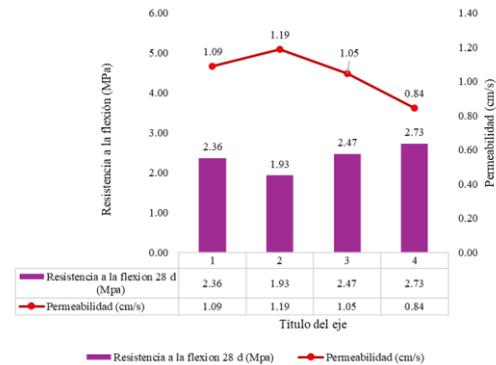


Fig. 12. Gráfico Resistencia a flexión vs Permeabilidad

D. Analisis de % de vacíos vs Permeabilidad

Como se observa en la Fig. 13, la mezcla base presenta un porcentaje de vacíos moderado y una permeabilidad equilibrada, gracias a vacíos bien distribuidos que permiten un flujo constante sin comprometer la cohesión del material, siendo adecuada para aplicaciones que requieren balance entre resistencia y drenaje. En la mezcla CR0, el mayor porcentaje de vacíos generado por el agregado reciclado incrementa la capacidad de infiltración, lo que la hace más eficiente en sistemas de drenaje pluvial [32], aunque con una ligera pérdida en resistencia estructural. La mezcla CR5, enriquecida con humo de sílice, reduce el porcentaje de vacíos y mejora la densificación de la matriz, disminuyendo la permeabilidad respecto a la CR0. Este cambio también incrementa la durabilidad frente a agentes agresivos, haciéndola ideal para aplicaciones donde la resistencia estructural y la durabilidad son prioritarias. Por último, la mezcla CR7 tiene la menor permeabilidad, ya que la alta densificación por humo de sílice cierra significativamente los vacíos interconectados, limitando su capacidad de infiltración, pero maximizando la resistencia. En conclusión, el porcentaje de vacíos tiene una relación directa con la permeabilidad: a mayor porcentaje de vacíos, mayor es la capacidad de infiltración. Sin embargo, las mezclas con menor porcentaje de vacíos ofrecen mayor densidad y resistencia, siendo más adecuadas para cargas estructurales. La elección de la mezcla dependerá de las necesidades específicas de cada aplicación, como drenaje, resistencia o durabilidad.

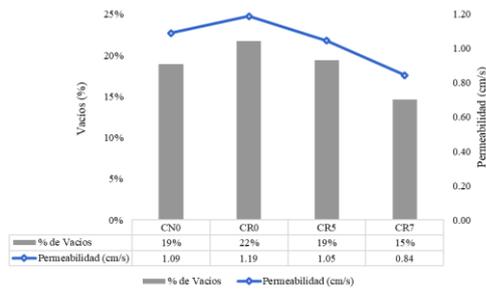


Figura 13. Gráfico de porcentaje de vacíos vs Permeabilidad

V. VALIDACIÓN

El tratamiento adecuado de los agregados reciclados y el diseño de mezclas con reemplazo parcial de cemento por humo de sílice permitieron desarrollar concretos permeables con propiedades mecánicas y funcionales superiores, cumpliendo las normativas ACI 522R-2010 [22] y CE.010 para pavimentos urbanos [28]. El tratamiento de los agregados reciclados mediante remojo en lechada al 20 % de concentración redujo en más de un 15 % el porcentaje de absorción en comparación con el agregado original, gracias a la capa adicional de cemento que cubrió su superficie. Este proceso, seguido por un tamizado con malla N°4, eliminó partículas excedentes, garantizando mezclas homogéneas y optimizando la calidad del diseño. Frente a ello, se valida que dicha técnica es más apropiada a comparación de la estudiada por Paula et al. [33], donde ponen en condición de superficie seca saturada a los A.C.R., logrando alcanza una resistencia a compresión de 17,65 MPa y permeabilidad entre 1,20 cm/s a 1,76 cm/s, resultandos inferiores al emplear A.C.R. tratado en lechada de cemento.

En cuanto a las dosificaciones, se emplearon reemplazos de 5 % y 7 % de humo de sílice junto con un 25 % de agregado reciclado tratado, obteniendo valores máximos de resistencia a compresión a los 28 días de 21,67 MPa, 15,21 MPa, 19,10 MPa y 22,54 MPa para las diferentes mezclas. La mezcla con 7 % de humo de sílice presentó el mejor desempeño, superando en un 129 % el valor mínimo normativo de 17,5 MPa. Con dichos resultados, se valida el estudio realizado por Goran et al. [34], donde demuestra que el reemplazo de HS en 5,5 % hasta 7 % es óptimo para un diseño de CP.

Respecto a la resistencia a flexión, todas las mezclas superaron el mínimo normativo de 1 MPa, alcanzando valores de hasta 2,73 MPa. Las vigas evaluadas mostraron un comportamiento adecuado, con roturas localizadas en las zonas de mayor esfuerzo, confirmando la efectividad del diseño estructural.

La permeabilidad también fue óptima (1,09 cm/s, 1,19 cm/s, 1,05 cm/s y 0,84 cm/s) no solo cumplieron con los requisitos normativos de 1,4 a 12,2 mm/s, sino que además demostraron la capacidad del concreto permeable para gestionar eficientemente las aguas. Incluso la mezcla menos permeable, con 7 % de humo de sílice, mostró un desempeño funcional para aplicaciones de filtración, validando la propuesta como una solución sostenible y efectiva.

En conclusión, el estudio confirmó que el uso de agregados reciclados tratados y humo de sílice permite obtener concretos permeables que equilibran propiedades mecánicas y funcionales. Estos materiales son ideales para pavimentos urbanos, al combinar resistencia, durabilidad y una adecuada capacidad de filtración, promoviendo soluciones sostenibles en la construcción.

VI. CONCLUSIONES

- Gracias al tratamiento realizado con lechada de cemento, el porcentaje de absorción de los agregados reciclados disminuyó en 15 % a comparación de los que no fueron tratados, evidenciando así la funcionalidad del tratamiento.
- En comparación con la muestra que empleó 100 % de agregado natural, aquella con la presencia únicamente del agregado reciclado tratado al 25 % demostró tener un comportamiento inferior en términos de resistencia a compresión y a flexión. Situación que mejoró al adicionarle los diversos porcentajes de reemplazo de humo de sílice, lo que permitió una mejora incremental de sus propiedades mecánicas.
- El desempeño del diseño con 25 % de ACRT. y reemplazo en 5 % demostró ser lento a corto plazo ya que alcanzó un porcentaje únicamente de 51 % de lo requerido. Sin embargo, al analizar a los 28 días, los valores de resistencia a compresión aumentaron en más del 50 % evidenciando así mejoras a largo plazo gracias a la presencia del humo de sílice.
- La permeabilidad de los diseños únicamente con agregado reciclado tratado fue mayor respecto a los resultados de las muestras que incluyen humo de sílice. Puesto que, debido a dicho componente, se incrementó exponencialmente la impermeabilidad del concreto, lo que equivale a un aumento de la resistencia a compresión, caso sucedido en los diseños con reemplazo de 5 % y 7 %.
- El diseño que demostró un desempeño requerido para su aplicación en concreto de pavimentos rígidos fue el nominado 25 % AR - 7 % HS. Esta conclusión se demuestra gracias a que las resistencias a compresión y flexión superaron ampliamente los mínimos requeridos. De la misma manera, los valores de permeabilidad y porcentaje de vacíos, a pesar de ser los menores de todos los diseños, cumplieron con los requisitos del ACI 522R-10 [22] llegando a 0,84 cm/s y 15 % respectivamente.

AGRADECIMIENTO

A la Dirección de Investigación de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por el apoyo brindado para realización de este trabajo de investigación a través del incentivo UPC-EXPOST-2025-1.

REFERENCIAS

- [1] T. Joshi y U. Dave, "Construction of pervious concrete pavement stretch, Ahmedabad, India – Case study," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e00622, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00622.
- [2] M. Nazeer, K. Kapoor, y S. P. Singh, "Impact of recycled concrete aggregates on the strength and durability properties of pervious concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 76, no. 6, pp. 272–291, Oct. 2023, doi: 10.1680/jmacr.23.00089.
- [3] S. Chen, C. Xing, M. Zhao, J. Zhang, L. Wang, y Q. He, "Recycled aggregate pervious concrete: analysis of influence of water-cement ratio and fly ash under single action and optimal design of mix proportion" *Journal Of Renewable Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 799–819, Sep. 2021, doi: 10.32604/jrm.2022.017285.
- [4] D. Gómez-Cano, Y. Arias-Jaramillo, R. Bernal-Correa, y J. Tobón, "Effect of enhancement treatments applied to recycled concrete aggregates on concrete durability: A review", *Mater. constr.*, vol. 73, no. 349, p. e308, Feb. 2023.
- [5] S. Bagiouk, D. Sotiriadis, y K. L. Katsifarakis, "Combining pocket parks with ecological rainwater management techniques in high-density urban environments" *Environmental Processes*, vol. 11, no. 1, Feb. 2024, doi: 10.1007/s40710-024-00690-x.
- [6] D. A. Ahmad, A. Y. A. Goody, D. F. A. Askari, M. R. J. Ahmad, y S. A. Ahmad, "Evaluating the effect of using waste concrete as partial replacement of coarse aggregate in concrete, experimental and modeling," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 10, no. 1, Oct. 2024, doi: 10.1007/s41024-024-00521-4.
- [7] H. Panghal y A. Kumar, "Enhancing concrete performance: Surface modification of recycled coarse aggregates for sustainable construction," *Construction and Building Materials*, vol. 411, p. 134432, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134432.
- [8] A. Alqarni, H. Abbas, K. Al-Shwikh, y Y. Al-Salloum, "Influence of treatment methods of recycled concrete aggregate on behavior of high strength concrete," *Buildings*, vol. 12, no. 4, p. 494, Apr. 2022, doi: 10.3390/buildings12040494.
- [9] J. Ximenes, C. Jesus, J. Aguiar, y J. Pais, "Mix design and physical and mechanical properties of pervious concretes," *Materiales De Construcción*, vol. 72, no. 348, p. e297, Oct. 2022, doi: 10.3989/mc.2022.292722.
- [10] M. A. Khan, J. Ahmad, H. A. Khan, y M. Umer, "High strength rubberized porous concrete for sustainable pavements: Engineering properties and life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 451, p. 142012, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142012.
- [11] J. Zhang, H. Sun, X. Shui, y W. Chen, "Experimental investigation on the properties of sustainable pervious concrete with different aggregate gradation" *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 17, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s40069-023-00625-0.
- [12] B. Haddad, H. Karaky, M. Boutouil, B. Boudart, y N. Sebaibi, "Investigation properties of pervious and Water-Retaining recycled concrete to mitigate urban heat island phenomena," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5384, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065384.
- [13] B. Odero, R. Mutuku, T. Nyomboi, y Z. Gariy, "Mechanical strength and water transport properties of concrete containing treated recycled aggregates," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 16, no. 1, Sep. 2022, doi: 10.2174/18741495-v16-e2206060.
- [14] C. Chen, K. Zhang, Z. Yin, y J. Zhou, "Deterioration Performance of Recycled Aggregate Pervious Concrete under Freezing–Thawing Cycle and Chloride Environment," *Buildings*, vol. 13, no. 3, p. 645, Feb. 2023, doi: 10.3390/buildings13030645.
- [15] W. Yuan, L. Ji, L. Meng, M. Fang, y X. Zhang, "Influence of Mineral Admixtures on the Performance of Pervious Concrete and Microscopic Research", *Buildings*, vol. 14, n.o 2, p. 533, feb. 2024, doi: 10.3390/buildings14020533.
- [16] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.009: Cementos. terminología, clasificación y especificaciones*, Lima, Perú, 2001.
- [17] ASTM International, *ASTM C150: Standard specification for portland cement*, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [18] ASTM International, *ASTM C204: Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus*, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [19] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 400.037: Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto*, Lima, Perú, 2001.
- [20] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.027: Agregados. Determinación de la granulometría por tamizado*, Lima, Perú, 2002.
- [21] ASTM International, *ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete*, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [22] American Concrete Institute, *ACI 522R-10: Report on pervious concrete*, Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- [23] American Concrete Institute, *ACI 211.3R-02: Guide for selecting proportions for no-slump concrete*, Farmington Hills, MI, USA, 2002.
- [24] X. Bai, H. Zhou, X. Bian, X. Chen, and C. Ren, "Compressive strength, permeability, and abrasion resistance of pervious concrete incorporating recycled aggregate," *Sustainability*, vol. 16, no. 10, p. 4063, May 2024, doi: 10.3390/su16104063.
- [25] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 400.017: Concreto. Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en concreto fresco mediante el método de presión*, Lima, Perú, 2001.
- [26] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.051: Cementos hidráulicos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión*, Lima, Perú, 2003.
- [27] ASTM International, *ASTM C293: Standard test method for flexural strength of concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [28] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, *Norma técnica CE.010: Diseño y construcción de pavimentos rígidos*, Lima, Perú, 2009.
- [29] L. Yang, S. Kou, X. Song, M. Lu, and Q. Wang, "Analysis of properties of pervious concrete prepared with difference paste-coated recycled aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121244, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121244.
- [30] R. Liu *et al.*, "Influence of pore structure characteristics on the mechanical and durability behavior of pervious concrete material based on image analysis," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, Jun. 2020, doi: 10.1186/s40069-020-00404-1.
- [31] S. K. Pradhan y N. Behera, "Performance assessment of pervious concrete road on strength and permeability by using silica fume," *Materials Today Proceedings*, vol. 60, pp. 559–568, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.018.
- [32] V. Cominato, F. B. Canteras, L. A. Gachet, and R. C. C. Lintz, "The effect of granulometry of natural and recycled coarse aggregate on permeable concrete properties," *Materials Today Proceedings*, vol. 65, pp. 1711–1718, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.717.
- [33] A. Paula Junior *et al.*, "Characterisation and Life Cycle Assessment of Pervious Concrete with Recycled Concrete Aggregates", *Crystals*, vol. 11, n.o 2, p. 209, feb. 2021, doi: 10.3390/cryst11020209.
- [34] G. Adil, J. T. Kevern, y D. Mann, "Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete", *Construction And Building Materials*, vol. 247, p. 118453, mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118453.