

ANALYSIS OF THE STRENGTH AND PERMEABILITY OF A PERMEABLE PAVEMENT DESIGNED WITH DIFFERENT PERCENTAGES OF RECYCLED CONCRETE.

Elmer Alex Fernandez Bustamante, Bach.¹, Lilian Rocío Villanueva Bazán, Maestra², Victor Raul Sebastian Lucano, Maestro³

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00278264@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, Lilian.villanueva@upn.edu.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, sebastianlucanovictorraul@gmail.com

Abstract - *The general objective of the research is to analyse the influence of using 10%, 15% and 20% recycled concrete (RCA) as a substitute for coarse aggregate on the compressive strength and permeability of a permeable pavement in urban projects in Cajamarca. This study was carried out due to the need to find sustainable and efficient alternatives that improve the properties of concrete, thus allowing the construction of more resistant pavements with adequate infiltration capacity, adapted to the current demands of sustainability and stormwater management. To achieve this objective, an experimental study was designed in which detailed laboratory tests were carried out on the aggregates, as well as the preparation of cylindrical specimens with different proportions of recycled concrete: 10%, 15% and 20%. These specimens, together with control (standard) samples, were subjected to compressive strength and permeability tests at 7, 14 and 28 days of curing. Statistical analysis of the data was performed using ANOVA tests, at a 5% significance level, to determine whether variations in the proportion of RCA significantly impacted the mechanical and permeability properties of the concrete.*

Keywords: Recycled concrete, Compressive strength, Permeability, Permeable pavement, Drainage.

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA Y PERMEABILIDAD DE UN PAVIMENTO PERMEABLE DISEÑADO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CONCRETO RECICLADO.

Resumen - La investigación tiene como objetivo general analizar la influencia de la utilización del 10%, 15% y 20% de concreto reciclado (ACR) como sustituto del agregado grueso en la resistencia a la compresión y permeabilidad de un pavimento permeable en proyectos urbanos en Cajamarca. Este estudio se llevó a cabo debido a la necesidad de encontrar alternativas sostenibles y eficientes que mejoren las propiedades del concreto, permitiendo así la construcción de pavimentos más resistentes y con capacidad de infiltración adecuada, adaptados a las demandas actuales de sostenibilidad y manejo de aguas pluviales. Para lograr este objetivo, se diseñó un estudio experimental en el que se llevaron a cabo ensayos de laboratorio detallados sobre los agregados, así como la preparación de probetas cilíndricas con diferentes proporciones de concreto reciclado: 10%, 15% y 20%. Estos especímenes, junto con muestras de control (Patrón), fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión y pruebas de permeabilidad a los 7, 14 y 28 días de curado. El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando pruebas ANOVA, con un nivel de significancia del 5%, para determinar si las variaciones en la proporción de ACR impactan significativamente en las propiedades mecánicas y permeables del concreto.

Palabras claves: Concreto reciclado, Resistencia a la compresión, Permeabilidad, Pavimento permeable, Drenaje.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las ciudades alrededor del mundo se enfrentan a múltiples retos relacionados con la gestión adecuada del agua y la mitigación de inundaciones, problemas que se han intensificado con el cambio climático y el crecimiento urbano desordenado [1]. En el contexto peruano, Cajamarca, una ciudad ubicada en un valle montañoso del norte, no es ajena a estos problemas. Durante la temporada de lluvias intensas, el sistema de drenaje de la ciudad no logra manejar los grandes volúmenes de agua, lo cual incrementa la frecuencia de inundaciones, afectando la infraestructura, las viviendas y, en algunos casos, poniendo en peligro la seguridad y bienestar de sus residentes [2]. Este escenario demanda soluciones innovadoras que, además de controlar los riesgos asociados con las inundaciones, contribuyan a la sostenibilidad ambiental.

A nivel global, la infraestructura verde, en especial los pavimentos permeables, ha emergido como una alternativa viable para gestionar el agua superficial al permitir que el agua de lluvia se infiltre a través del pavimento y se absorba en el suelo subyacente [3]. Estos pavimentos no solo mitigan los

riesgos de inundaciones, sino que también promueven la recarga de acuíferos, lo cual es crucial para zonas con estrés hídrico. En Cajamarca, la implementación de pavimentos permeables representa una oportunidad para adaptar la infraestructura vial a las necesidades actuales.

La utilización de concreto reciclado no solo responde a la necesidad de materiales de construcción sostenibles, sino que también está en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, particularmente con los ODS 11 y 13, relacionados con la creación de ciudades sostenibles y la acción climática.

Para el desarrollo y sustento de esta investigación, es importante citar los siguientes antecedentes que se consideran de suma importancia, como el estudio de la referencia [4], quien evaluó la utilización de puzolana de vidrio reciclado en concreto permeable. Su investigación determinó que la adición de puzolana en proporciones de hasta un 2% como sustituto parcial del cemento Portland permitió obtener concretos con una resistencia óptima y características de permeabilidad adecuadas para aplicaciones en veredas y ciclovías. Este hallazgo es relevante, ya que establece un límite de sustitución efectivo que mejora las propiedades del material. Otro antecedente importante es el de la referencia [5], quienes analizaron de qué manera las características físicas de los agregados afectan el desempeño del concreto permeable. En su investigación, concluyeron que un mayor contenido de agregado fino mejora la resistencia a la compresión y flexión, mientras que el tamaño del agregado grueso tiene un impacto directo en la permeabilidad. Este estudio proporcionó información clave sobre la combinación ideal de agregados para garantizar un equilibrio entre resistencia y permeabilidad, con resultados significativos en las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto. De igual forma, en la referencia [6] estudiaron la incorporación de plastómeros en el concreto permeable, demostrando que la adición de un 1.5% de este material mejoró significativamente las propiedades físicas, mecánicas y de permeabilidad del concreto. Los resultados de su investigación indican que la utilización de aditivos innovadores, como los plastómeros, puede optimizar la eficiencia hidráulica y la durabilidad de los pavimentos permeables, lo que abre nuevas posibilidades en el diseño de pavimentos urbanos sostenibles. Finalmente, los estudios de las referencias [7] y [8] se centraron en el uso de agregados

reciclados y nanosílice en el concreto permeable. En sus investigaciones, acreditaron que el reemplazo de los agregados tradicionales por reciclados aumenta la resistencia a la compresión del concreto, mientras que la adición de nanosílice incrementa la permeabilidad, lo que es clave para las infraestructuras urbanas.

De igual manera, se identificaron y establecieron las bases teóricas más importantes vinculadas al tema de estudio, como se expone a continuación:

Concreto Permeable: El concreto permeable es un material que posibilita el paso del agua de lluvia o superficial a través de su esqueleto poroso, facilitando su infiltración y drenaje. Representa una alternativa ecológica para el manejo de aguas pluviales y contribuye a mitigar las inundaciones [9].

Resistencia y Permeabilidad: La resistencia a la compresión es crucial para garantizar que el concreto soporte cargas adecuadas en pavimentos, mientras que la permeabilidad permite controlar el paso del agua, lo cual es esencial en la gestión de aguas pluviales. El coeficiente de permeabilidad, que se calcula mediante el uso de un permeámetro, determina la capacidad del concreto para filtrar agua y es fundamental para el diseño de pavimentos eficientes [10] y [11].

Sostenibilidad: La sostenibilidad en la construcción busca equilibrar el desarrollo económico combinado con la protección del medio ambiente, fomentando el uso responsable de los recursos naturales y la disminución de la huella de carbono. Es clave en el desarrollo de infraestructuras que no solo sean funcionales, sino también respetuosas con el entorno [12].

El presente trabajo de investigación se lleva a cabo debido a la necesidad de mejorar las características de pavimentos en áreas urbanas, particularmente en Cajamarca, donde se enfrentan problemas recurrentes de inundaciones causadas por lluvias intensas. En este contexto, el uso de materiales reciclados, como el concreto reciclado, surge como una alternativa para optimizar las características del concreto, particularmente en términos de su resistencia y permeabilidad. La problemática principal que se aborda es la deficiencia en el diseño de pavimentos que no cumplen con los requisitos de resistencia y eficiencia necesarios para gestionar adecuadamente las aguas pluviales. Esta deficiencia en los pavimentos actuales incrementa el riesgo de inundaciones, lo cual afecta a la infraestructura urbana y la seguridad de la población.

En este estudio se propone la incorporación de concreto reciclado como sustituto parcial del agregado grueso en proporciones de 10%, 15% y 20%. La elección de estos porcentajes se fundamenta en estudios previos que evidencian que dichos niveles permiten evaluar de manera precisa el comportamiento del material sin comprometer significativamente sus propiedades estructurales ni su capacidad de infiltración. Además, este rango progresivo facilita la observación de tendencias en las propiedades del

concreto, permitiendo realizar comparaciones claras entre las mezclas y establecer un equilibrio óptimo entre resistencia a la compresión y permeabilidad.

Por ello, la principal interrogante de esta investigación es: ¿Cómo influye la incorporación de 10%, 15% y 20% de concreto reciclado como sustituto del agregado grueso en la resistencia a la compresión y permeabilidad de un pavimento permeable en Cajamarca durante el año 2024? Además, se plantean preguntas específicas como: ¿Cuál es el porcentaje óptimo de concreto reciclado para maximizar la resistencia y la permeabilidad del pavimento permeable? ¿Cómo afectan los diferentes porcentajes de concreto reciclado al diseño de mezcla planteado y sus propiedades de durabilidad y eficiencia en condiciones reales?

El objetivo general de la investigación es analizar la influencia de la utilización de 10%, 15% y 20% de concreto reciclado como sustituto del agregado grueso en la resistencia a la compresión y permeabilidad de un pavimento permeable en Cajamarca. Con este fin, se establecen objetivos específicos como diseñar la mezcla de concreto permeable, ajustando los porcentajes de concreto reciclado en lugar del agregado grueso, realizar pruebas de las propiedades del concreto permeable en probetas cilíndricas, evaluando su resistencia a la compresión y permeabilidad, y determinar el porcentaje más adecuado de concreto reciclado que optimice las características mecánicas y de permeabilidad del concreto permeable.

La hipótesis general de la investigación plantea que la incorporación de 10%, 15% y 20% de concreto reciclado como sustituto del agregado grueso generará variaciones significativas en las propiedades de resistencia a la compresión y permeabilidad del pavimento permeable, alcanzando niveles adecuados para su uso en la construcción urbana. Asimismo, las hipótesis específicas consideran que el incremento de concreto reciclado influirá positivamente en la resistencia a la compresión del pavimento permeable, superando la resistencia estándar de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, que las probetas de concreto permeable mostrarán variaciones en su capacidad de soportar carga bajo compresión y en su permeabilidad, proporcionando datos valiosos sobre su desempeño en condiciones reales, y que existe un porcentaje óptimo de concreto reciclado que maximiza la resistencia, permeabilidad y durabilidad del pavimento permeable, haciéndolo adecuado para su uso en áreas de tráfico vehicular.

Esta investigación es crucial para hacer frente al problema de las inundaciones en Cajamarca, que se agrava por la falta de pavimentos permeables adecuados. Al incorporar concreto reciclado como sustituto del agregado grueso, se busca mejorar la capacidad de los pavimentos para gestionar las aguas pluviales y reducir los riesgos de inundación, al mismo tiempo que se promueve el reciclaje y la sostenibilidad. Además, el estudio contribuirá al conocimiento sobre la resistencia y

permeabilidad del concreto permeable, cerrando una brecha importante en la literatura y proporcionando una solución viable para otras ciudades con problemas similares. Este enfoque no solo beneficia la infraestructura urbana, sino que también fomenta el uso responsable de materiales reciclados en la ingeniería civil.

II. METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se basa en un diseño aplicado, con el objetivo de evaluar los efectos del empleo de concreto reciclado (ACR) como reemplazo del agregado grueso en la fabricación de pavimentos permeables. Se emplea un enfoque cuantitativo, dado que se recogerán datos numéricos relacionados con las propiedades mecánicas y permeables del concreto, para determinar la viabilidad del pavimento bajo condiciones de carga. A su vez, la investigación tiene un enfoque explicativo, ya que busca explicar cómo diferentes porcentajes de ACR afectan la resistencia y permeabilidad del concreto permeable. Para ello, se llevará a cabo un diseño experimental en condiciones controladas, manipulando las variables del ACR en la mezcla de concreto y observando su impacto en las propiedades del pavimento.

Debido a que se emplearon materiales reciclados en la fabricación del concreto, se consideraron cuidadosamente las posibles variaciones en las propiedades del agregado reciclado (ACR). Para mitigar su impacto en los resultados se realizaron ensayos de caracterización básica del ACR, tales como granulometría, absorción y peso específico. Estos ensayos permitieron realizar una clasificación adecuada del material reciclado, asegurando su viabilidad para ser utilizado en las mezclas. Además, se descartaron partículas con impurezas visibles o contaminantes, priorizando aquellos fragmentos homogéneos en tamaño y textura.

El proceso metodológico incluye la elaboración de 48 testigos de concreto, distribuidos en 12 para ensayos de permeabilidad y 36 para pruebas de compresión. Estos testigos se elaborarán siguiendo cuatro dosificaciones diferentes de concreto reciclado, incluyendo un diseño patrón sin agregado reciclado. El curado de las probetas se realizará durante 28 días en condiciones estándar. Durante el periodo de curado de las probetas, las condiciones ambientales registradas se mantuvieron en promedio a una temperatura de 18 °C ± 2 °C y una humedad relativa aproximada del 75%. Aunque no se empleó una cámara de curado climatizada, se procuró conservar las muestras en un ambiente interior estable y protegido de la exposición directa al sol o a corrientes de aire que pudieran acelerar el proceso de evaporación. Estas condiciones fueron monitoreadas diariamente para asegurar una referencia adecuada del entorno en el que las muestras desarrollaron su resistencia.

A continuación, se presenta de forma detallada la muestra utilizada en el trabajo de investigación:

TABLA 1
CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR A LOS 7, 14 Y 28 DÍAS

ENSAYO	ESPECÍMENES DE CONCRETO	CANTIDAD DE ENSAYOS		
		7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
Resistencia a la compresión	Patrón	3	3	3
	Con 10% de AR.	3	3	3
	Con 15% de AR.	3	3	3
	Con 20% de AR.	3	3	3
Permeabilidad	Patrón			3
	Con 10% de AR.			3
	Con 15% de AR.			3
	Con 20% de AR.			3
TOTAL		48		

Nota. Se ensayarán testigos de concreto añadiendo un 0%, 10%, 15% y 20% de ACR a los 7, 14 y 28 días en los laboratorios de la Universidad Privada del Norte.

Se emplearon ensayos de laboratorio como el análisis granulométrico de los agregados, el peso unitario, la densidad y la absorción, conforme a las normas técnicas peruanas correspondientes. En relación con los ensayos de las probetas, se llevaron a cabo pruebas de compresión mediante el uso de una máquina de ensayo y se realizaron pruebas de permeabilidad mediante un permeámetro.

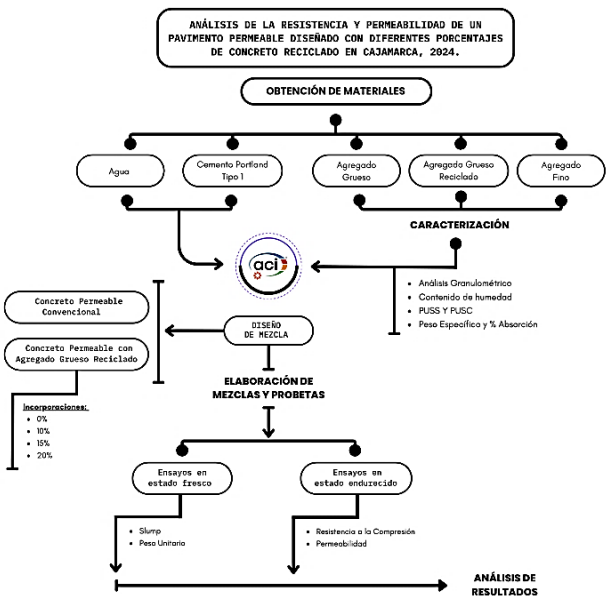


Fig. 1 Procedimiento para la recolección de información.

Para la recolección de información, se siguió un procedimiento sistemático descrito en la figura 1. Este proceso comenzó con la obtención de materiales, seguidos por la caracterización de sus propiedades físicas. A continuación, se diseñaron cuatro mezclas de concreto: una mezcla patrón y otras tres con 10%, 15% y 20% de agregado de concreto reciclado (ACR). Posteriormente, se elaboraron las probetas y se sometieron a un proceso de curado. Se realizaron ensayos para evaluar sus propiedades a los 7, 14 y 28 días. Finalmente, se llevó a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos para evaluar el comportamiento y la eficiencia de cada diseño.

El diseño del concreto permeable se basó en la norma ACI 522-R10, tomando en cuenta los requisitos de resistencia y permeabilidad. La investigación pretende establecer los criterios para obtener una mezcla óptima de concreto reciclado, capaz de proporcionar un pavimento funcional y sostenible para la ciudad de Cajamarca, contribuyendo al manejo de aguas pluviales y la sostenibilidad vial.

Para la recopilación de datos, se emplearán instrumentos previamente calibrados y se mantuvo un control estricto sobre las condiciones de fabricación y curado de las probetas. Los datos obtenidos de los ensayos se registraron de manera sistemática y se analizaron utilizando software estadístico como Excel y el complemento Real Statistics. El análisis de resultados incluye medidas descriptivas como la media, la desviación estándar y la varianza, así como la prueba ANOVA para validar la hipótesis sobre el impacto de la incorporación de ACR en las propiedades mecánicas y permeables del concreto.

III. RESULTADOS

Los resultados principales de esta investigación se exponen en cuatro secciones, las cuales se describen a continuación.

A. Propiedades físicas de los agregados.

Las tablas N° 2 y N° 3 presentan las propiedades físicas de los agregados gruesos (AG), agregados finos (AF) y el agregado de concreto reciclado (ACR) utilizados en esta investigación. Los datos obtenidos representan el promedio de tres ensayos realizados en los laboratorios de la Universidad Privada del Norte, en los cuales se analizaron parámetros como el peso unitario, peso específico, absorción y otras propiedades físicas clave para el diseño del pavimento permeable.

TABLA 2
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DEL AGREGADO GRUESO Y FINO

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO GRUESO (AG)	AGREGADO FINO (AF)	UND.
Peso unitario compactado	1585.16	1780.34	Kg/m3
Peso unitario suelto	1434.35	1649.04	Kg/m3

Peso específico aparente (Seco)	2.59	2.46	g/cm3
Peso específico aparente (SSS)	2.63	2.57	g/cm3
Peso específico nominal (Seco)	2.70	2.76	g/cm3
Absorción	1.59	4.38	%
Contenido de humedad	0.59	2.47	%
Tamaño máximo nominal	3/4" (19 mm)	N° 4 (4.75 mm)	-

TABLA 3
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DEL AGREGADO GRUESO RECICLADO (ACR)

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO RECICLADO (ACR)	UND.
Peso unitario compactado	1238.11	Kg/m3
Peso unitario suelto	1060.68	Kg/m3
Peso específico aparente (Seco)	2.36	g/cm3
Peso específico aparente (SSS)	2.41	g/cm3
Peso específico nominal (Seco)	2.49	g/cm3
Absorción	2.29	%
Contenido de humedad	0.65	%
Tamaño máximo nominal	3/4" (19 mm)	-

B. Resultados de los diseños de mezcla.

En la Tabla N° 4 se presenta la dosificación de los cuatro tipos de mezclas de pavimento permeable utilizados: Patrón (0% ACR), 10% ACR, 15% ACR y 20% ACR. Estas mezclas fueron diseñadas tomando como referencia los parámetros establecidos en la norma ACI 522 R-10 y las propiedades físicas de los agregados descritas en las Tablas 2 y 3. Cada mezcla fue compactada en tres capas, aplicando 25 golpes por capa, para asegurar una adecuada distribución y compactación del material.

TABLA 4
DOSIFICACIONES DE MEZCLA PARA CONCRETO PERMEABLE POR METRO CÚBICO

MATERIALES	DISEÑO			
	PATRÓN	10% ACR	15% ACR	20% ACR
Cemento (Kg)	325.20	325.20	325.20	325.20
Agua (Lt)	96.69	96.69	96.69	96.69
Grava (Kg)	1347.87	1198.11	1123.23	1048.35

ACR (Kg)	0.00	117.78	176.67	235.56
Agregado Fino (Kg)	149.76	149.76	149.76	149.76

Nota. Las cantidades de ciertos materiales varían según el porcentaje de ACR empleado. Cabe destacar que las cantidades indicadas corresponden a un metro cúbico.

C. Resultados de las propiedades del concreto permeable.

La Tabla N° 5 ofrece un resumen consolidado de las propiedades físicas y mecánicas promedio del concreto permeable analizado, abarcando parámetros como la resistencia a la compresión, porosidad y el coeficiente de permeabilidad. Estos resultados consideran las diferentes dosificaciones utilizadas y su influencia en las características fundamentales del material.

TABLA 5
RESUMEN PROMEDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE EN ESTADO ENDURECIDO

DISEÑO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K)	POROSIDAD (%)	ESFUERZO A LA COMPRESIÓN (f _c)		
			7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
	(cm/s)	%	(kg/cm ²)		
Patrón	0.43	24.7	93.05	138.39	199.28
10% ACR	0.49	25.5	100.86	155.89	216.30
15% ACR	0.55	25.9	110.27	160.94	229.73
20% ACR	0.60	26.3	107.91	158.73	221.58

Nota. Los valores presentados en esta tabla corresponden al promedio de cada una de las propiedades.

TABLA 6
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE POR TIPO DE DISEÑO Y EDAD DE CURADO

DISEÑO	EDAD					
	7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
	F _c		F _c		F _c	
	(Kg/cm ²)	(%)	(Kg/cm ²)	(%)	(Kg/cm ²)	(%)
Patrón	93.05	44.31	138.39	65.90	199.28	94.89
10% ACR	100.86	48.03	155.89	74.23	216.30	103.00
15% ACR	110.27	52.51	160.94	76.64	229.73	109.39
20% ACR	107.91	51.38	158.73	75.58	221.58	105.52

Nota. Los valores presentados en esta tabla corresponden al promedio calculado.

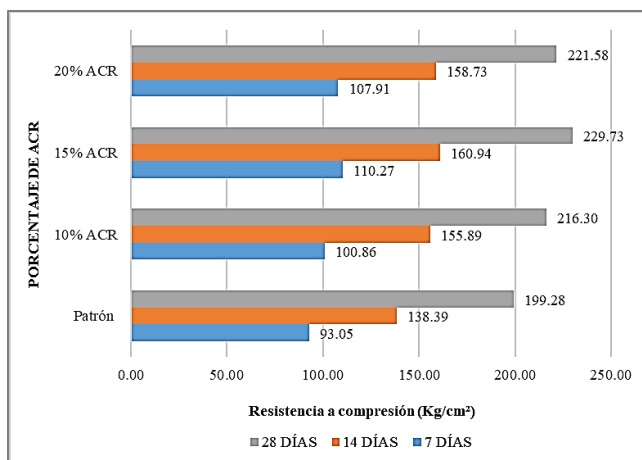


Fig. 2 Resistencia a la compresión promedio según el porcentaje de ACR.

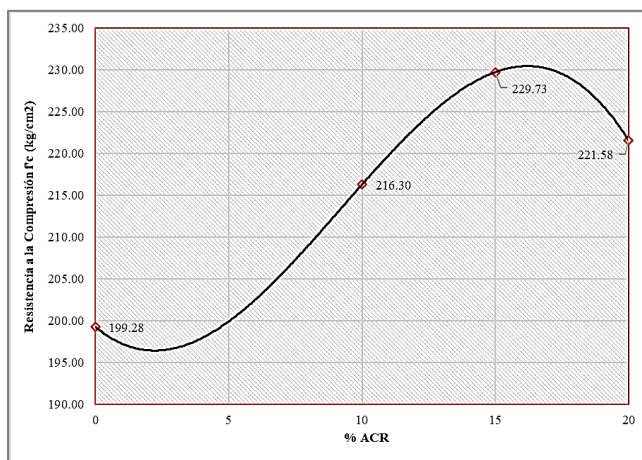


Fig. 3 Tendencia del comportamiento de la resistencia a compresión en función del %ACR.

TABLA 7
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE A LOS 28 DÍAS DE CURADO

DISEÑO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	
	K (cm/s)	K (mm/s)
Patrón	0.43	4.30
10% ACR	0.49	4.90
15% ACR	0.55	5.50
20% ACR	0.60	6.00

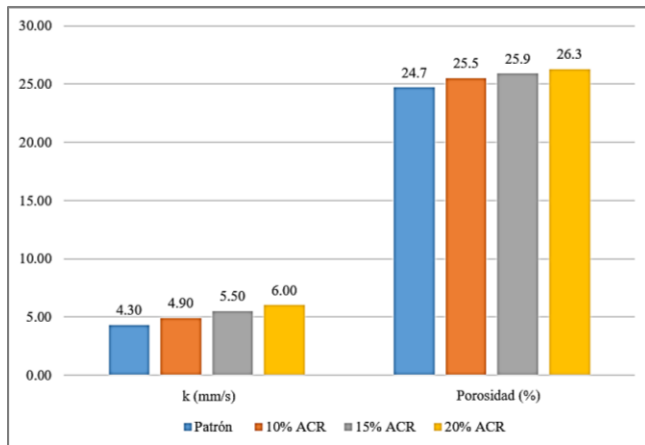


Fig. 4 Permeabilidad y porosidad de los testigos de concreto.

D. Resultados de la prueba de hipótesis.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la prueba de hipótesis, empleando el análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de las diferencias en la resistencia a la compresión y la permeabilidad entre las distintas mezclas de concreto evaluadas. Para este análisis, se empleó un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), con el fin de determinar si las variaciones en los porcentajes de agregado de concreto reciclado (ACR) en las cuatro mezclas diseñadas (patrón, 10%, 15% y 20% ACR) generan un efecto estadísticamente significativo en las propiedades mecánicas y permeables del concreto en estudio.

TABLA 8
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Patrón	3	597.83	199.28	3.52
10% ACR	3	648.89	216.30	7.08
15% ACR	3	689.18	229.73	18.38
20% ACR	3	664.75	221.58	4.26

TABLA 9
PRUEBA ANOVA PARA LOS VALORES DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P value
Entre grupos	1491.94	3	497.31	59.83	8.02E-06
Dentro de los grupos	66.50	8	8.31		

Total 1558.43 11

El análisis estadístico de la resistencia a la compresión, mediante la prueba ANOVA, arrojó un p-value de 8.02×10^{-6} , el cual es inferior al nivel de significancia del 5%. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que la incorporación de ACR en las distintas proporciones utilizadas en el estudio efectivamente produce variaciones notables en la resistencia a la compresión del concreto permeable a los 28 días.

TABLA 10
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Patrón	3	1.29	0.43	4.00E-04
10% ACR	3	1.48	0.49	2.33E-04
15% ACR	3	1.66	0.55	2.33E-04
20% ACR	3	1.79	0.60	2.33E-04

TABLA 11
PRUEBA ANOVA PARA LOS VALORES DE LA PERMEABILIDAD.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P value
Entre grupos	4.74E-02	3	1.58E-02	57.41	9.38E-06
Dentro de los grupos	2.20E-03	8	2.75E-04		
Total	4.96E-02	11			

El análisis estadístico de la permeabilidad, mediante la prueba ANOVA, arrojó un p-value de 9.38×10^{-6} , el cual es inferior al nivel de significancia del 5%. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que la incorporación de ACR en las distintas proporciones utilizadas en el estudio efectivamente produce variaciones notables en la permeabilidad del concreto permeable a los 28 días.

IV. DISCUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue analizar el impacto del uso de diferentes porcentajes de concreto reciclado (ACR) como sustituto del agregado grueso en la resistencia a la compresión y la permeabilidad de pavimentos permeables en Cajamarca. Los resultados obtenidos evidencian que la adición de ACR mejora la permeabilidad y fortalece la resistencia a la

compresión hasta cierto punto, lo cual está en línea con hallazgos de estudios previos, como los de la referencia [13].

El diseño patrón, sin ACR, exhibió un coeficiente de permeabilidad de 0.43 cm/s y una resistencia a la compresión de 199.28 kg/cm². Al incorporar un 10% de ACR, la permeabilidad aumentó a 0.49 cm/s y la resistencia a 216.30 kg/cm². Con un 15% de ACR, la permeabilidad llegó a 0.55 cm/s y la resistencia a 229.73 kg/cm². Finalmente, con un 20% de ACR, la permeabilidad alcanzó su máximo de 0.60 cm/s, mientras que la resistencia fue de 221.58 kg/cm². Estos resultados demuestran que existe un porcentaje óptimo de ACR que maximiza tanto la permeabilidad como la resistencia antes de que el efecto estabilizador comience a declinar.

Los hallazgos confirman la relevancia de ajustar el contenido de materiales reciclados para optimizar las propiedades del pavimento permeable sin comprometer su resistencia mecánica. Además, los valores de p obtenidos en el análisis ANOVA, inferiores al 5% de significancia, permitieron aceptar la hipótesis alternativa, evidenciando el impacto positivo del ACR en las propiedades evaluadas.

Comparado con otras investigaciones como la referencia [7] que también reportaron mejoras en propiedades del concreto permeable con ACR en proporciones moderadas, este estudio refuerza la necesidad de identificar un balance entre los porcentajes de sustitución para maximizar beneficios estructurales y permeables. Sin embargo, se reconocen limitaciones como la variabilidad en la calidad del ACR y el control ambiental durante el curado, que pudieron influir en los resultados. Para futuras investigaciones, se recomienda evaluar el desempeño a largo plazo de estos pavimentos en condiciones de tráfico y clima reales, y explorar otros materiales reciclados o aditivos que complementen el uso de ACR.

La investigación presentó limitaciones relacionadas con la variabilidad en la calidad del concreto reciclado (ACR) utilizado como agregado grueso, ya que su obtención a partir de testigos reciclados ocasionó diferencias en la composición del material, dificultando el control de uniformidad en las mezclas. Esta variabilidad pudo afectar los resultados de resistencia a la compresión y permeabilidad. Asimismo, las condiciones ambientales durante la fase de hidratación de las probetas de concreto, como la temperatura y la humedad, no fueron estrictamente controladas, lo que posiblemente impactó la ganancia de resistencia del concreto permeable. La falta de un entorno completamente controlado para las pruebas pudo introducir sesgos en los resultados, limitando la precisión de las mediciones.

Los hallazgos tienen importantes implicancias teóricas y prácticas. Teóricamente, aportan al conocimiento sobre el uso de ACR en pavimentos permeables, proporcionando información clave sobre cómo los diferentes porcentajes de este

material influyen en las propiedades mecánicas y de permeabilidad. En la práctica, los resultados son útiles para ingenieros civiles y autoridades municipales interesados en soluciones sostenibles, destacando el ACR como una alternativa para reducir residuos y mejorar la permeabilidad en pavimentos. A futuro, se recomienda investigar el desempeño a largo plazo de pavimentos con ACR bajo condiciones reales de tráfico y clima, explorar otros materiales reciclados o aditivos, y analizar la viabilidad económica y el impacto ambiental en proyectos de mayor escala.

V. CONCLUSIONES

Se evaluó la influencia de la utilización del 10%, 15% y 20% de concreto reciclado (ACR) como reemplazo del agregado grueso en la capacidad de compresión y la permeabilidad de un pavimento permeable. Los resultados indicaron que el uso de ACR tiene un impacto positivo tanto en la permeabilidad como en la resistencia a la compresión, con incrementos en ambas propiedades a medida que aumenta el porcentaje de agregado reciclado, por lo cual se evidencia que la inclusión de ACR puede optimizar las propiedades mecánicas y de permeabilidad del concreto, haciéndolo una opción viable para su implementación en pavimentos sostenibles.

Se logró realizar el diseño de mezcla del concreto permeable variando los porcentajes de ACR (10%, 15% y 20%). Este proceso permitió identificar que a mayor porcentaje de ACR, el diseño de la mezcla requiere un ajuste más preciso para mantener el equilibrio entre resistencia y permeabilidad. La mezcla que incorporó un 20% de ACR mostró el coeficiente de permeabilidad más alto y un nivel de resistencia a la compresión satisfactorio, lo que confirma que la utilización de ACR es viable en diseños de mezcla para pavimentos permeables.

Los ensayos realizados en probetas cilíndricas demostraron variaciones significativas en las propiedades mecánicas y permeables del concreto permeable según el porcentaje de ACR utilizado. A los 28 días, la resistencia a la compresión de las probetas aumentó de 199.28 kg/cm² en el diseño patrón a 229.73 kg/cm² para el caso del 15% de ACR. Asimismo, la permeabilidad también se incrementó, de 0.43 cm/s en la mezcla patrón a 0.60 cm/s con el 20% de ACR. Asimismo, estos resultados confirman la hipótesis de que el uso de ACR mejora tanto la capacidad de soportar carga como la permeabilidad del concreto.

Se determinó que el porcentaje óptimo de sustitución de agregado grueso por concreto reciclado (ACR) es el 20%, dado que este porcentaje ofreció un equilibrio óptimo entre las propiedades mecánicas y permeables del concreto. Esta mezcla alcanzó el mayor valor de permeabilidad, al mismo tiempo que

mantuvo la resistencia a la compresión en niveles superiores a los establecidos en el diseño, lo que la convierte en una opción adecuada para aplicaciones de pavimentos permeables. Aunque el 15% de ACR presentó la mayor resistencia a la compresión, la evaluación general del estudio priorizó el balance entre ambas propiedades, favoreciendo una mayor capacidad de infiltración sin comprometer significativamente la resistencia del material. Esta elección responde al objetivo principal de la investigación, que busca optimizar la funcionalidad hidráulica del pavimento sin sacrificar su desempeño estructural, haciendo del 20% de ACR la opción más adecuada desde una perspectiva técnica y medioambiental, promoviendo al mismo tiempo prácticas constructivas más sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] I. Duque y J. Montoya, «Cambio climático y urbanización», *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, vol. 30, n.º 2, 2021, Accedido: 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2021000200274
- [2] ONU - Habitat, «Sequías, tormentas e inundaciones: El agua y el cambio climático dominan la lista de desastres». Accedido: 5 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>
- [3] J. Zhang, H. Sun, X. Shui, y W. Chen, «Experimental Investigation on the Properties of Sustainable Pervious Concrete with Different Aggregate Gradation», *Int J Concr Struct Mater*, vol. 17, n.º 1, p. 64, dic. 2023, doi: 10.1186/s40069-023-00625-0.
- [4] F. Pereyra, «Evaluación de un concreto permeable adicionando diferentes porcentajes de puzolana de vidrio reciclado para su aplicación en veredas y ciclovías en el distrito de Reque-Chiclayo 2021», Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2023. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio de Tesis USAT. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/6512>
- [5] I. Amaya y A. Navarro, «Influencia de las propiedades físicas de los agregados en el concreto permeable para fines de pavimentación, Trujillo 2022», Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, 2024. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio Digital de la Universidad Privada Antenor Orrego. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/19031>
- [6] K. Hilares y J. Camacho, «Evaluación del comportamiento del concreto poroso permeable mediante la incorporación de plastómeros en el distrito de Chalhuanca, provincia de Aymaraes – Apurímac», Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, 2023. Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio institucional UNAMBA. <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1341>
- [7] L. Cachay, «Variación de la resistencia a compresión de un concreto permeable de $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo plastificante Sikament® 290N al reemplazar en diferentes porcentajes el agregado grueso por agregado de concreto reciclado», Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2022. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4761>
- [8] M. Sánchez, «Comportamiento del concreto permeable con incorporación de diferentes porcentajes de agregado fino y adición de nanosilíce en la ciudad Jaén- Cajamarca», Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2023. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/6263>
- [9] J. E. Ayala-López, E. Gil-Ahumada, R. D. Cornejo-Ramos, y S. P. Muñoz-Pérez, «Metodologías empleadas para la producción de concreto permeable usando parcialmente materiales reciclados como agregados: una revisión literaria», *Tecnológicas*, vol. 25, n.º 53, p. e2080, mar. 2022, doi: 10.22430/22565337.2080.
- [10] Cemex, «¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?» Accedido: 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Artículos de Construcción. [https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20\(psi\).](https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-#:~:text=La%20resistencia%20a%20la%20compresi%C3%B3n%20simple%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20mec%C3%A1nica,por%20pulgada%20cuadrada%20(psi).)
- [11] J. Fierro, A. Parra, y C. Vásquez, «DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE LAS COMUNAS 1, 3 Y 5 DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT - CUNDINAMARCA», Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia, 2017. Accedido: 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repository Universidad Piloto de Colombia. <https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5643/TRABAJO%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] S. Madroñero-Palacios y T. Guzmán-Hernández, «Desarrollo sostenible. Aplicabilidad y sus tendencias», *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 31, n.º 3, oct. 2018, doi: 10.18845/tm.v31i3.3907.
- [13] V. Cotrina y J. Huaccha, «Variación de la permeabilidad y la resistencia a la compresión del concreto $f_c=175 \text{ kg/cm}^2$ en pavimentos rígidos en zonas urbanas, utilizando tiras de plástico y fibra de polipropileno, Cajamarca 2022», Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, 2023. Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/36448>