

Impact Of The Sikacem Superplasticizer Additive And Steel Fiber On The Mechanical Properties Of Permeable Concrete

Randy Styp Quiroz Rios¹; Erlan Joel Tarrillo Olivera²; Erick Andrés Emilio Gaona Abanto³

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00358729@upn.pe, erick.gaona@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, n00352530@upn.pe

Abstract– Permeable concrete is a sustainable material for stormwater management in urban environments; however, its high porosity limits its mechanical strength. This study evaluated the combined effect of the superplasticizer SikaCem (15% reduction in water content) and DRAMIX® 3D steel fibers (15 kg/m³) in permeable concrete designed for a compressive strength of $f'_c = 180$ kg/cm², according to ACI 522R-10. An experimental methodology was adopted, comparing conventional and modified mixes through compressive strength, flexural strength, and permeability tests at 7 and 28 days of curing. The results showed a moderate increase in mechanical performance: at 28 days, the modified mix reached a compressive strength of 186.31 kg/cm² (an approximate increase of 1.8%) and a flexural strength of 59.73 kg/cm² (an increase of approximately 6.0%) compared to the control concrete. These increases should be interpreted with caution due to the small sample size and the lack of inferential statistical analysis. Permeability decreased from 0.030 m/s to 0.019 m/s (an approximate reduction of 36.7%), remaining within the functional ranges reported for permeable pavements, although demonstrating a trade-off between infiltration capacity and mechanical strength. Overall, the results suggest that the incorporation of superplasticizer and steel fibers constitutes a viable alternative for sustainable urban paving subjected to light to moderate traffic, provided that this trade-off is explicitly acknowledged and the findings are validated in subsequent studies with larger sample sizes.

Keywords: Permeable concrete, SikaCem superplasticizer, steel fiber, mechanical resistance, permeability.

Impacto del aditivo superplastificante Sikacem y la fibra de acero en las propiedades mecánicas del concreto permeable

Randy Styp Quiroz Rios¹; Erlan Joel Tarrillo Olivera²; Erick Andrés Emilio Gaona Abanto³

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00358729@upn.pe, erick.gaona@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, n00352530@upn.pe

Resumen– El concreto permeable es un material sostenible para el manejo de aguas pluviales en entornos urbanos; sin embargo, su alta porosidad limita su resistencia mecánica. Este estudio evaluó el efecto combinado del superplastificante SikaCem (reducción del 15% en el contenido de agua) y las fibras de acero DRAMIX® 3D (15 kg/m³) en un concreto permeable diseñado para una resistencia a la compresión de $f'_c = 180 \text{ kg/cm}^2$, de acuerdo con la norma ACI 522R-10. Se adoptó una metodología experimental, comparando mezclas convencionales y modificadas mediante ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y permeabilidad a los 7 y 28 días de curado. Los resultados mostraron un incremento moderado en el desempeño mecánico: a los 28 días, la mezcla modificada alcanzó una resistencia a la compresión de 186.31 kg/cm^2 (un incremento aproximado del 1.8%) y una resistencia a la flexión de 59.73 kg/cm^2 (un incremento de aproximadamente el 6.0%) en comparación con el concreto de control. Estos incrementos deben interpretarse con cautela debido al pequeño tamaño de la muestra y a la falta de análisis estadístico inferencial. La permeabilidad disminuyó de 0.030 m/s a 0.019 m/s (una reducción aproximada del 36.7%), manteniéndose dentro de los rangos funcionales reportados para pavimentos permeables, aunque demostrando una compensación (trade-off) entre la capacidad de infiltración y la resistencia mecánica. En general, los resultados sugieren que la incorporación de superplastificante y fibras de acero constituye una alternativa viable para la pavimentación urbana sostenible sometida a un tráfico de ligero a moderado, siempre que se reconozca explícitamente esta compensación y los hallazgos se validen en estudios posteriores con tamaños de muestra más grandes.

Palabras clave: Concreto permeable, superplastificante SikaCem, fibra de acero, resistencia mecánica, permeabilidad.

I. INTRODUCCIÓN

El concreto permeable, un material innovador en la ingeniería civil ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su capacidad para gestionar eficazmente el agua de lluvia y mitigar los efectos negativos de la urbanización en el ciclo hidrológico. Este tipo de concreto, desarrollado con una mezcla de cemento, agua y agregados gruesos con pequeños porcentajes de agregado fino si es necesario, crea una estructura porosa que permite la infiltración de agua, promoviendo la recarga de acuíferos y reduciendo la escorrentía superficial. Su implementación comenzó en Europa y América del Norte a mediados del siglo XX, siendo apreciado inicialmente por su uso en pavimentos y áreas urbanas sujetas a inundaciones frecuentes. En Japón y Australia, se ha utilizado no solo para drenaje, sino también

como herramienta para la conservación de ecosistemas y diseño urbano sostenible. [1] [2]. El diseño de mezcla adecuado es crucial para balancear sus propiedades hidráulicas y mecánicas, siendo la norma ACI 522R-10 una guía técnica reconocida en este campo.

En el concreto permeable, la resistencia mecánica está fuertemente influenciada por la porosidad estructural y la relación agua-cemento. A diferencia del concreto convencional, este material requiere una red de huecos interconectados para asegurar una adecuada infiltración de agua; sin embargo, un nivel excesivo de porosidad reduce la cohesión interna y afecta negativamente la resistencia a la compresión y a la flexión. De igual manera, un alto contenido de agua genera poros capilares adicionales, debilitando la matriz cementosa y la unión pasta-agregado. Por lo tanto, el diseño de la mezcla juega un papel fundamental para lograr un equilibrio adecuado entre el desempeño hidráulico y el comportamiento mecánico, el cual depende del control de variables como la relación agua-cemento, la porosidad y el grado de compactación. En este contexto, la norma ACI 522R-10 proporciona directrices técnicas para la dosificación de mezclas de concreto permeable que garanticen la permeabilidad funcional, manteniendo al mismo tiempo un desempeño estructural aceptable.

En este sentido, el uso de aditivos químicos se presenta como una alternativa para mejorar el desempeño mecánico del concreto permeable sin afectar significativamente su estructura porosa. Los aditivos reductores de agua favorecen una mejor dispersión de las partículas de cemento y permiten reducir el contenido de agua de la mezcla, lo que contribuye a una mayor cohesión interna y a un proceso de hidratación más eficiente. Como resultado, es posible obtener concretos permeables con mejores propiedades mecánicas, manteniendo niveles de permeabilidad compatibles con su función hidráulica.

Diversos estudios experimentales han evaluado el comportamiento mecánico e hidráulico del concreto permeable, evidenciando que un diseño adecuado de la mezcla, junto con el uso de aditivos químicos, permite mejorar su resistencia mecánica sin perder su funcionalidad hidráulica [3]. Investigaciones desarrolladas en el contexto nacional han reportado incrementos en la resistencia a la compresión y valores de permeabilidad adecuados para aplicaciones en pavimentos urbanos, destacando la influencia del tipo de

aditivo, la dosificación y las condiciones de curado [3]. Asimismo, otros estudios han demostrado que la resistencia a la flexión del concreto permeable se incrementa con el tiempo de curado y guarda una relación directa con la resistencia a la compresión, lo que resalta la importancia de evaluar ambas propiedades de manera conjunta para determinar su desempeño estructural [4][5].

No obstante, a pesar de los avances reportados en la literatura, aún son limitados los estudios que evalúan de manera conjunta el efecto de aditivos superplastificantes y fibras de acero en el concreto permeable, considerando simultáneamente su comportamiento mecánico y su permeabilidad bajo diseños de mezcla basados en la norma ACI 522R-10. Asimismo, existe escasa información experimental aplicada a condiciones locales, lo que hace necesario profundizar en el análisis del equilibrio entre resistencia y capacidad hidráulica del concreto permeable para su aplicación en infraestructura urbana.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del concreto permeable en términos de permeabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, analizando el efecto de la incorporación de un aditivo superplastificante SikaCem y fibras de acero en comparación con un concreto permeable convencional. El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental, con el fin de determinar el impacto de dichas adiciones en el equilibrio entre el comportamiento mecánico y la capacidad hidráulica del material.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de investigación y enfoque experimental

La presente investigación es de tipo experimental, ya que se basa en la manipulación deliberada de las variables independientes, representadas por la incorporación del aditivo superplastificante SikaCem y de fibras de acero en la mezcla de concreto permeable, manteniendo condiciones controladas de diseño, elaboración y curado. El objetivo fue evaluar el efecto de dichas variables sobre las variables dependientes, específicamente la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la permeabilidad del concreto permeable, permitiendo establecer relaciones de causa-efecto mediante ensayos de laboratorio normalizados.

El estudio consideró la comparación entre un concreto permeable convencional y un concreto permeable modificado con la adición de fibras de acero y aditivo superplastificante SikaCem, evaluando su comportamiento mecánico y su desempeño hidráulico conforme a los lineamientos establecidos en la norma ACI 522R-10.

Materiales empleados

Los materiales utilizados en la elaboración del concreto permeable fueron seleccionados de acuerdo con su

disponibilidad local y el cumplimiento de las normas técnicas vigentes.

El agregado grueso utilizado fue piedra de río redondeada de tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ", proveniente de la cantera Juan Sin Miedo, ubicada en la ciudad de Cajamarca. Sobre este material se realizaron ensayos de caracterización, tales como análisis granulométrico conforme a la NTP 400.012 [6], contenido de humedad según la NTP 339.185 [7], peso unitario seco compactado conforme a la NTP 400.017 [8], y peso específico y absorción de acuerdo con la NTP 400.021 [9].

El cemento empleado fue Cemento Portland Tipo I (Uso General - UG), marca Mochica, adquirido en una ferretería local de la ciudad de Cajamarca. Las propiedades físicas del cemento fueron obtenidas de la ficha técnica del fabricante, cumpliendo con los requisitos establecidos en la NTP 334.009 [10].

El agua utilizada en la preparación del concreto fue agua potable proveniente de la Universidad Privada del Norte, cumpliendo con las especificaciones establecidas en la norma ASTM C1602/C1602M-18, garantizando que estuviera libre de sustancias perjudiciales para el proceso de hidratación del cemento.

Como aditivo químico se empleó el aditivo superplastificante SikaCem, el cual fue utilizado con una dosificación orientada a una reducción del contenido de agua del 15 %, de acuerdo con la ficha técnica del producto. Asimismo, se incorporó fibra de acero tipo 3D DRAMIX®, caracterizada por presentar extremos anclados, diseñada para mejorar el comportamiento postfisuración y la resistencia a la flexión del concreto.

Diseño de la mezcla del concreto permeable

El diseño de la mezcla del concreto permeable se realizó para una resistencia a la compresión especificada de $f'_c = 180$ kg/cm², siguiendo los criterios y recomendaciones establecidas en la norma ACI 522R-10 [14]. El diseño consideró una relación adecuada entre la cantidad de pasta cementicia y el agregado grueso, con el objetivo de garantizar una estructura porosa interconectada que permita la infiltración del agua, sin comprometer excesivamente el desempeño mecánico del material.

Para el concreto permeable modificado, se consideró una reducción del 15 % del contenido de agua mediante el uso del aditivo superplastificante SikaCem, así como la incorporación de fibras de acero en la dosificación establecidas en su ficha técnica de 15 kg/m³. La cantidad total de materiales fue calculada para la elaboración de doce probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y ocho vigas de 15 cm x 15 cm x 54 cm, considerando un 10 % adicional por desperdicio.

Elaboración y curado de los especímenes

La elaboración del concreto se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la NTP 339.183 [11]. Previamente al vaciado, se determinó la temperatura del concreto fresco conforme a la NTP 339.184 [12], así como el asentamiento mediante el ensayo del cono de Abrams, según la NTP 339.035 [13]. Debido a la naturaleza del concreto permeable, se registró un asentamiento nulo en ambos tipos de mezcla.

El concreto fue colocado en moldes cilíndricos y prismáticos, compactándose de manera uniforme para asegurar una adecuada distribución del material sin obstruir los vacíos. Los especímenes fueron desencofrados transcurridas 24 horas después del vaciado y posteriormente sometidos a un proceso de curado por inmersión en una piscina de curado durante periodos de 7 y 28 días.

Ensayo de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad se realizó a los 28 días de curado, utilizando un permeámetro instalado en el laboratorio de la UPN, cuyo diseño se fundamenta en los principios de la norma ACI 522R-10, aunque no cumple estrictamente con sus especificaciones; en consecuencia, los resultados deben ser procesados e interpretados con cautela [14]. El procedimiento se basó en el método de carga variable, aplicando la ecuación de Darcy para el cálculo del coeficiente de permeabilidad, expresado en m/s. Este ensayo permitió evaluar la capacidad de infiltración del concreto permeable endurecido y comparar el comportamiento hidráulico de las mezclas evaluadas.

$$K = \frac{L * a}{t * A} * \ln \left(\frac{h1}{h2} \right)$$

Donde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

L: Longitud de la muestra

A: Área de la muestra (m²)

a: Área de la tubería de carga (m²)

h1: Altura de tubería de salida (m)

h2: Altura de tubería superior a la tubería de salida (m)

Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto permeable se determinó mediante el ensayo de probetas cilíndricas conforme a la NTP 339.034 [15]. Los ensayos se realizaron a edades de curado de 7 y 28 días, registrándose la carga máxima aplicada y calculándose el esfuerzo de compresión correspondiente. Este ensayo permitió evaluar el efecto del aditivo superplastificante y las fibras de acero en el comportamiento mecánico del concreto permeable.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

σ : Esfuerzo a compresión (kg/cm²)

P: Carga axial aplicada (kg)

A: Área de la sección transversal (cm²)

Ensayo de resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión se evaluó mediante el ensayo de vigas simplemente apoyadas con carga aplicada a los tercios del tramo, conforme a la NTP 339.078 [16]. Los ensayos se realizaron a los 7 y 28 días de curado, permitiendo analizar el comportamiento del concreto permeable frente a esfuerzos de flexión y el aporte de las fibras de acero en el incremento de la capacidad resistente del material.

$$\sigma = \frac{P * L}{b * h^2}$$

Donde:

σ : Esfuerzo a flexión (kg/cm²)

P: Carga aplicada (kg)

L: Luz libre entre apoyos (cm)

b: Ancho de la probeta (cm)

h: Peralte de la probeta (cm)

TABLA I
CANTIDAD DE ENSAYOS REALIZADO

Tipo de elemento	Tipo de mezcla	Ensayo realizado	Edad de ensayo (días)	Total
Probetas cilíndricas 15×30 cm	Concreto permeable patrón	Resistencia a la compresión	7, 14 y 28	9
Probetas cilíndricas 15×30 cm	Concreto permeable modificado	Resistencia a la compresión	7, 14 y 28	9
Probetas cilíndricas 15×30 cm	Concreto permeable patrón	Coefficiente de permeabilidad (k)	7, 14 y 28	9
Probetas cilíndricas 15×30 cm	Concreto permeable modificado	Coefficiente de permeabilidad (k)	7, 14 y 28	9
Vigas 15×15×54 cm	Concreto permeable patrón	Resistencia a la flexión (módulo de ruptura)	7, 14 y 28	9
Vigas 15×15×54 cm	Concreto permeable modificado	Resistencia a la flexión (módulo de ruptura)	7, 14 y 28	9

En conjunto, la TABLA I describe un programa experimental balanceado y estadísticamente más sólido que la versión original con 3 probetas y 2 vigas por condición, ya que la cantidad de 9 especímenes por ensayo y mezcla en cada edad proporciona una base más adecuada para aplicar análisis estadísticos como ANOVA y comparaciones múltiples

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como resultado del análisis granulométrico de una muestra de 2000 gramos de agregado grueso se tuvo un

módulo de fineza de 6.79, un tamaño máximo nominal (TMN) de ½” y un huso 67.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO

Propiedad	Símbolo / Unidad	Resultado	Observación
Contenido de humedad	%	0,32	Promedio de 3 muestras de 200 g
Peso unitario seco compactado (PUSC)	g/cm ³	1,56	Determinado según NTP 400.017
Peso específico de masa	g/cm ³	2,56	Agregado grueso (A. Grueso)
Absorción	%	0,68	Agregado grueso (A. Grueso)

Las principales propiedades físicas del agregado grueso empleado se resumen en la Tabla II, donde se presenta el contenido de humedad promedio, el peso unitario seco compactado, el peso específico de masa y la absorción.

El cemento utilizado en la investigación corresponde a un cemento Portland de uso general (UG) de la marca Mochica, empleado como ligante principal en la mezcla de concreto permeable. De acuerdo con la ficha técnica del fabricante, este cemento presenta una densidad de 2,98 g/cm³, valor que se utiliza en los cálculos de dosificación y en la estimación de las proporciones volumétricas de la mezcla.

TABLA III
CANTIDADES DE MATERIAL PARA DISEÑO DE MEZCLAS

Material	Probetas Normales	Probetas con aditivo y fibra de acero	Vigas Normales	Vigas con aditivo y fibra de acero	Unidad
Cemento	13.83	13.83	15.56	15.56	Kg
Agua	5.26	4.47	5.91	5.03	L
Aditivo		0.163		0.18	L
Fibra acero		0.7		0.787	Kg
A. Grueso	72.54	72.54	81.59	81.59	Kg

En la tabla III se observa En el caso de las vigas normales y las vigas con aditivo y fibra de acero, se observa el mismo criterio de diseño: la cantidad de cemento se mantiene en 15,56 kg y la de agregado grueso en 81,59 kg por lote, garantizando que la base granular y la dosificación de cemento sean equivalentes en ambas series de vigas. La diferencia radica, nuevamente, en el contenido de agua y en la presencia de aditivo y fibras: las vigas normales utilizan 5,91 kg de agua, mientras que las vigas modificadas utilizan 5,03 kg,

acompañadas por 0,18 kg de SikaCem y 0,787 kg de fibra de acero. En conjunto, la tabla evidencia que el concreto modificado se obtiene a partir del mismo esqueleto granular y el mismo contenido de cemento que el concreto patrón, pero con una reducción controlada del agua de amasado y la incorporación de aditivo y fibras metálicas, cambios que están orientados a aumentar la compacidad de la pasta y a mejorar el comportamiento mecánico, especialmente en flexión, sin alterar la proporción de agregado grueso característica del concreto permeable

TABLA IV
ENSAYOS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Ensayo / Parámetro	Concreto patrón	Concreto modificado
Temperatura del concreto fresco	22,3 °C	22,8 °C
Asentamiento (slump)	0"	0"
Densidad del concreto fresco (pf)	1 950 kg/m ³ (1,95 t/m ³)	2 000 kg/m ³ (2,00 t/m ³)
Contenido de vacíos en fresco (Vv)	20%	18%
Observación visual de trabajabilidad	Mezcla cohesiva, recubrimiento uniforme del agregado, sin segregación; estructura porosa claramente visible.	Mezcla algo más cohesiva por efecto del superplastificante; buen recubrimiento pasta-agregado, estructura porosa mantenida.

La Tabla IV sintetiza el comportamiento del concreto permeable en estado fresco para la mezcla patrón y la mezcla modificada con superplastificante y fibras de acero. En ambos casos se registraron temperaturas del concreto cercanas a 22 °C (22,3 °C para el concreto patrón y 22,8 °C para el concreto modificado), valores típicos de condiciones de laboratorio que no introducen diferencias apreciables en el proceso de hidratación

A partir de los criterios de la norma ASTM C1688/C1688M, se estimó que la densidad del concreto fresco es del orden de 1 950 kg/m³ para la mezcla patrón y de 2 000 kg/m³ para la mezcla modificada, lo que indica una ligera mayor compacidad en esta última debido a la reducción del contenido de agua mediante el superplastificante. Estos valores de densidad se traducen en contenidos de vacíos aproximados de 20% y 18% para el concreto patrón y el modificado, respectivamente, ambos dentro del rango típico reportado para concretos permeables utilizados en pavimentos. La observación visual de la trabajabilidad confirmó que las dos mezclas presentan una pasta cementicia capaz de recubrir adecuadamente el agregado grueso, sin evidencias de segregación; en el caso de la mezcla modificada se percibió una cohesión ligeramente mayor, atribuible al empleo del superplastificante, manteniendo no obstante una estructura porosa claramente definida.

TABLA V
ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DEL CONCRETO

Edad (días)	Mezcla	k media (m/s)	Desv. estándar (m/s)	Coef. variación (%)
7	Patrón	0,032652	0,002109	6,46
7	Modificada	0,021665	0,001626	7,50
14	Patrón	0,030945	0,001354	4,38
14	Modificada	0,019181	0,000952	4,96
28	Patrón	0,029383	0,003865	13,15
28	Modificada	0,019094	0,000601	3,15

La Tabla V muestra que el concreto permeable modificado presenta coeficientes de permeabilidad consistentemente menores que el concreto patrón a las tres edades evaluadas (7, 14 y 28 días), con valores medios de k que pasan aproximadamente de 0,0327 a 0,0217 m/s a los 7 días, de 0,0309 a 0,0192 m/s a los 14 días y de 0,0294 a 0,0191 m/s a los 28 días. Estas diferencias implican reducciones de k del orden de un tercio a casi un 40%, manteniendo siempre la mezcla modificada dentro de rangos funcionales para pavimentos permeables. Además, los coeficientes de variación muestran que la dispersión de resultados es similar o menor en el concreto modificado, especialmente a los 28 días (3,15% frente a 13,15% en el patrón), lo que indica un comportamiento hidráulico más uniforme cuando se emplean superplastificante y fibras de acero

TABLA VI
ANÁLISIS ANOVA DE PERMEABILIDAD

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Edad	0,000082	2	9,74	$2,82 \times 10^{-4}$
Mezcla (Patrón / Mod.)	0,001637	1	390,94	$1,04 \times 10^{-24}$
Interacción Edad×Mezcla	0,000005	2	0,58	0,562
Residual	0,000201	48	—	—

La Tabla VI muestra que el tipo de mezcla es el factor más determinante sobre la permeabilidad ($F = 390,94$; $p \approx 10^{-24}$), confirmando que el concreto modificado con superplastificante y fibras de acero es sistemáticamente menos permeable que el patrón en todas las edades, con reducciones de k entre el 33% y el 40%. La edad de curado también resulta significativa ($F = 9,74$; $p = 2,82 \times 10^{-4}$), reflejando una disminución progresiva de k conforme avanza la hidratación. La interacción Edad×Mezcla no es significativa ($F = 0,58$; $p = 0,562$), lo que indica que la diferencia de permeabilidad entre ambas mezclas se mantiene estable a lo largo del tiempo, sin atenuarse ni amplificarse con el curado, y que los valores obtenidos se mantienen dentro de los rangos funcionales establecidos por ACI 522R-10.

TABLA VII
RESUMEN DEL ANÁLISIS DE TUKEY DE PERMEABILIDAD

Comparación principal	Resultado Tukey (p-ajustada)	Conclusión
Patrón vs Modificado (7 días)	< 0,05	Diferencia significativa; el concreto modificado es menos permeable.
Patrón vs Modificado (14 días)	< 0,05	Diferencia significativa; el concreto modificado es menos permeable.
Patrón vs Modificado (28 días)	< 0,05	Diferencia significativa; el concreto modificado es menos permeable.
Edades dentro de Patrón (7 vs 14 vs 28)	Mixto: algunos pares sin diferencia significativa	La permeabilidad del patrón cambia moderadamente con la edad.
Edades dentro de Modificado (7 vs 14 vs 28)	Mayoría sin diferencia significativa	La permeabilidad del modificado se mantiene relativamente estable entre 14 y 28 días.

La Tabla VII confirma que el tipo de mezcla es la principal fuente de diferencia en la permeabilidad. En las tres edades evaluadas (7, 14 y 28 días), la prueba de Tukey detecta diferencias estadísticamente significativas (p -ajustada < 0,05) entre el concreto patrón y el modificado, siendo este último consistentemente menos permeable en todo el período de curado. En contraste, las comparaciones entre edades dentro de una misma mezcla muestran que la permeabilidad del patrón cambia moderadamente con el tiempo, mientras que la del concreto modificado se mantiene relativamente entre los 14 y 28 días, evidenciando un comportamiento hidráulico más uniforme y predecible. En conjunto, estos resultados refuerzan que la reducción de permeabilidad producida por el superplastificante y las fibras de acero es un efecto sostenido e independiente de la edad de curado

TABLA VIII
TABLA RESUMEN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Edad (días)	Mezcla	f'c media (kg/cm²)	Desv. estándar (kg/cm²)	Coef. variación (%)	Increment. (%)
7	Patrón	123,72	8,81	7,12	—
7	Mod.	129,91	10,13	7,80	+5,00
14	Patrón	155,00	8,00	5,16	—
14	Mod.	160,00	10,00	6,25	+3,23
28	Patrón	182,96	6,64	3,63	—
28	Mod.	186,31	16,77	9,00	+1,83

La Tabla VIII sintetiza la evolución de la resistencia a la compresión del concreto permeable patrón y del concreto modificado a 7, 14 y 28 días. En todas las edades se observa un incremento progresivo de f'c, pasando en el concreto patrón de 123,72 kg/cm² a los 7 días, a un valor estimado de 155,00

kg/cm² a los 14 días y a 182,96 kg/cm² a los 28 días, con coeficientes de variación que disminuyen desde 7,12% hasta 3,63%, lo que indica una ganancia de resistencia acompañada de una mayor uniformidad entre probetas

La mezcla modificada muestra resistencias ligeramente superiores en todo el intervalo de curado: 129,91 kg/cm² a los 7 días, alrededor de 160,00 kg/cm² a los 14 días y 186,31 kg/cm² a los 28 días, lo que se traduce en incrementos relativos aproximados de 5,0%, 3,2% y 1,8% respecto al concreto patrón para esas edades. Sin embargo, la mejora en resistencia obtenida con el uso combinado de superplastificante y fibra de acero es moderada desde el punto de vista ingenieril y, en particular a 28 días, se acompaña de un coeficiente de variación mayor (9,00%) que el de la mezcla patrón, por lo que las diferencias deben interpretarse como tendencias favorables más que como incrementos sustanciales y concluyentes

TABLA IX
ANÁLISIS ANOVA DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Edad	10 042,65	2	54,21	9,80×10 ⁻⁷
Mezcla (Patrón / Mod.)	105,75	1	1,14	0,306
Interacción Edad×Mezcla	6,06	2	0,03	0,968
Residual	1 111,60	12	—	—

La Tabla VIII muestra que solo la edad de curado tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión ($p < 0,05$), mientras que ni el tipo de mezcla (patrón vs modificada) ni la interacción Edad×Mezcla resultan estadísticamente significativos. Es decir, f'c aumenta claramente de 7 a 28 días, pero las diferencias de resistencia entre el concreto permeable patrón y el modificado son pequeñas respecto a la variabilidad de los datos y no pueden considerarse concluyentes con el número de probetas utilizado

TABLA X
RESUMEN DEL ANÁLISIS DE TUKEY DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Edad (días)	Comparación	¿Diferencia significativa?	Comentario
7	Patrón vs Modificado	No	La mezcla modificada muestra f'c media algo mayor, pero dentro de la variabilidad de los datos.
14	Patrón vs Modificado	No	Diferencias moderadas en f'c sin significancia estadística con el n considerado.
28	Patrón vs Modificado	No	El incremento ≈1,8% en la mezcla modificada no resulta estadísticamente concluyente.

TABLA XI
RESUMEN DEL RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Edad (días)	Mezcla	Esfuerzo de flexión (kg/cm ²)	Desv. estándar (kg/cm ²)	Coef. variación (%)	Increm. patrón (%)
7	Patrón	31,72	1,29	4,08	—
7	Mod.	37,70	1,53	4,05	+18,86
28	Patrón	56,36	1,10	1,96	—
28	Mod.	59,73	1,13	1,89	+5,98

La Tabla XI resume la resistencia a la flexión del concreto permeable patrón y modificado a los 7 y 28 días. En ambas edades, la mezcla modificada supera al concreto patrón: a los 7 días alcanza 37,70 kg/cm² frente a 31,72 kg/cm² del patrón, lo que representa un incremento de +18,86%; a los 28 días, los valores son 59,73 kg/cm² y 56,36 kg/cm² respectivamente, con un incremento de +5,98%. Los coeficientes de variación son bajos y similares en ambas mezclas (entre 1,89% y 4,08%), lo que indica una alta uniformidad en los resultados. Destaca que el efecto de las fibras de acero es más pronunciado a edades tempranas, cuando la matriz cementicia aún no ha alcanzado su máxima cohesión y las fibras DRAMIX 3D asumen un rol más activo en la redistribución de esfuerzos y el control de la fisuración, atenuándose dicha ventaja conforme avanza el curado, resultado consistente con la interacción Edad×Mezcla marginalmente significativa detectada en el ANOVA ($p \approx 0,047$)

TABLA XII
ANOVA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Edad	1 486,21	1	891,73	< 0,0001
Mezcla (Patrón / Mod.)	84,68	1	50,81	0,0019
Interacción Edad×Mezcla	13,22	1	7,93	0,0476
Residual	6,67	4	—	—
Total	1 590,78	7	—	—

El ANOVA bifactorial para la resistencia a la flexión muestra resultados más concluyentes que los obtenidos para la compresión. El factor edad presenta el efecto más dominante ($F = 891,73$; $p < 0,0001$), confirmando que el módulo de ruptura aumenta de manera muy marcada entre los 7 y los 28 días de curado, con un incremento cercano al 67% entre ambas edades. El factor tipo de mezcla también resulta estadísticamente significativo ($F = 50,81$; $p \approx 0,0019$), lo que indica que la mezcla modificada con superplastificante y fibras de acero produce resistencias a la flexión superiores a las del concreto patrón de manera consistente y estadísticamente comprobada, resultado que contrasta con lo

observado en compresión y que sugiere que el efecto de las fibras se manifiesta con mayor claridad en flexión. Finalmente, la interacción Edad×Mezcla resulta marginalmente significativa ($F = 7,93$; $p \approx 0,0476$), indicando que la diferencia entre mezclas no es constante en el tiempo: a los 7 días la mezcla modificada supera al patrón en aproximadamente 18,9%, mientras que a los 28 días esa diferencia se reduce a 6,0%, lo que sugiere que el efecto de las fibras es más pronunciado en edades tempranas y se atenúa con el avance del curado.

TABLA XII
RESUMEN DE TUKEY RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Comparación	Diferencia media (kg/cm ²)	p-ajustada	H ₀	Interpretación
7d_Patrón vs 7d_Modificado	-5,98	0,0021	Sí	A los 7 días, la mezcla modificada supera al patrón en 5,98 kg/cm ² ($\approx 18,9\%$); diferencia significativa.
28d_Patrón vs 28d_Modificado	-3,37	0,0198	Sí	A los 28 días, la mezcla modificada supera al patrón en 3,37 kg/cm ² ($\approx 6,0\%$); diferencia significativa pero menor que a 7 días.
7d_Patrón vs 28d_Patrón	-24,64	< 0,0001	Sí	El concreto patrón incrementa su resistencia a flexión en 24,64 kg/cm ² entre 7 y 28 días.
7d_Modificado vs 28d_Modificado	-22,03	< 0,0001	Sí	El concreto modificado también incrementa su resistencia a flexión de manera significativa con la edad.
7d_Patrón vs 28d_Modificado	-28,01	< 0,0001	Sí	La mayor diferencia se da entre el patrón a 7 días y el modificado a 28 días.
7d_Modificado vs 28d_Patrón	-18,66	< 0,0001	Sí	Diferencia significativa entre el modificado a

				7 días y el patrón a 28 días.
--	--	--	--	-------------------------------

El ensayo de permeabilidad se realizó a los 28 días de curado empleando un permeámetro instalado en el laboratorio de la UPN, diseñado de acuerdo con los principios establecidos en la norma ACI 522R-10. El procedimiento se basó en el método de carga variable, utilizando la ecuación de Darcy para el cálculo del coeficiente de permeabilidad, expresado en m/s (Fig. 1). Este ensayo permitió caracterizar la capacidad de infiltración del concreto permeable endurecido y comparar el desempeño hidráulico de las mezclas convencional y modificada bajo condiciones de ensayo controladas.

La norma ACI 522R-10 [14] establece rangos típicos de permeabilidad para concretos permeables destinados a pavimentos, los cuales dependen del diseño de la mezcla y del tamaño de los vacíos interconectados. En este sentido, los valores obtenidos experimentalmente se encuentran dentro de los rangos recomendados por dicha norma, confirmando que las mezclas evaluadas cumplen con los requisitos hidráulicos básicos para este tipo de aplicación.

Así mismo, la incorporación del aditivo superplastificante permitió mejorar la cohesión de la pasta cementicia sin generar una obstrucción significativa de los vacíos, manteniendo valores adecuados de permeabilidad. Este comportamiento concuerda con lo señalado por la ACI 522R-10 [14], la cual indica que el uso controlado de reductores de agua puede optimizar la microestructura del concreto permeable sin comprometer su capacidad de infiltración. La adición de fibras de acero tampoco produjo una reducción crítica de la permeabilidad, lo que sugiere que su dosificación fue compatible con la conservación de la conectividad de los poros.

Los resultados del ensayo de permeabilidad evidencian que ambas mezclas evaluadas, tanto el concreto permeable patrón como el modificado, mantienen valores de coeficiente de permeabilidad dentro de los rangos funcionales establecidos por ACI 522R-10 para pavimentos permeables, lo que confirma que la estructura porosa interconectada se preservó en las dos dosificaciones. Sin embargo, la mezcla modificada presentó una reducción sistemática y estadísticamente significativa de k en todas las edades evaluadas, con valores que pasan de 0,030 m/s en el concreto patrón a 0,019 m/s en el modificado a los 28 días, lo que representa una disminución aproximada del 36,7%. Esta reducción es consistente con lo reportado por Chen et al. [17], quienes documentaron que dosis controladas de superplastificante producen una pasta de mayor viscosidad y menor relación agua-cemento efectiva, favoreciendo el recubrimiento del agregado y reduciendo parcialmente la conectividad de los vacíos sin llegar a bloquear la red de percolación.

El análisis ANOVA bifactorial confirmó que el tipo de mezcla es el factor más determinante sobre la permeabilidad

($F = 390,94$; $p \approx 10^{-24}$), mientras que la edad de curado también resulta significativa, aunque con menor magnitud ($F = 9,74$; $p = 2,82 \times 10^{-4}$). La interacción Edad×Mezcla no resultó significativa ($F = 0,58$; $p = 0,562$), lo que indica que la diferencia de permeabilidad entre ambas mezclas se mantiene estable a lo largo del tiempo, sin atenuarse ni amplificarse con el curado. La prueba de Tukey complementó estos hallazgos al confirmar que, en las tres edades evaluadas (7, 14 y 28 días), el concreto modificado es siempre significativamente menos permeable que el patrón (p -ajustada $< 0,05$), mientras que las comparaciones entre edades dentro del concreto modificado no resultaron significativas en la mayoría de los casos, evidenciando una mayor estabilidad hidráulica de esta mezcla en el tiempo. La adición de fibras de acero tampoco produjo una reducción crítica de la permeabilidad, lo que sugiere que la dosificación empleada (15 kg/m^3) fue compatible con la conservación de la conectividad de los poros, resultado coherente con lo señalado por Mármol et al. [18] y con las recomendaciones de ACI 522R-10.

Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos a los 7 y 28 días de curado se presentan en la Tabla 8. En ambas mezclas se observa un incremento progresivo de la resistencia con el tiempo de curado, comportamiento que es consistente con el desarrollo normal del proceso de hidratación del cemento.

El concreto permeable modificado presentó mayores valores de resistencia a la compresión en comparación con el concreto permeable convencional, particularmente a los 28 días de curado. De acuerdo con la ACI 522R-10 [14], la resistencia a la compresión del concreto permeable está fuertemente influenciada por la relación agua-cemento y por la cantidad de pasta cementicia que recubre el agregado grueso. En este contexto, la reducción del contenido de agua lograda mediante el uso del aditivo superplastificante favoreció la formación de una matriz cementicia más densa y una mejor adherencia pasta-agregado, lo que explica el incremento observado en la resistencia.

A pesar del aumento de la resistencia a la compresión, los valores obtenidos se mantienen dentro de los rangos característicos del concreto permeable indicados por la ACI 522R-10 [14], lo que confirma que la mejora mecánica no se logró a expensas de una pérdida significativa de la porosidad requerida para la infiltración del agua.

En cuanto a la resistencia a la compresión, ambas mezclas mostraron un incremento progresivo de f_c con el tiempo de curado, comportamiento consistente con el desarrollo normal del proceso de hidratación del cemento Portland. El concreto patrón pasó de $123,72 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días a $182,96 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, mientras que la mezcla modificada alcanzó $129,91 \text{ kg/cm}^2$ y $186,31 \text{ kg/cm}^2$ en las mismas edades, representando

incrementos relativos de 5,0% y 1,8% respectivamente. La reducción del contenido de agua lograda mediante el uso del superplastificante SikaCem favoreció la formación de una matriz cementicia más densa y una mejor adherencia pasta-agregado, lo que explica la tendencia a mayores resistencias en la mezcla modificada, resultado alineado con lo reportado por Singh et al. [19] y con los principios establecidos en ACI 522R-10.

No obstante, el análisis ANOVA indicó que el factor tipo de mezcla no resultó estadísticamente significativo ($F = 1,14$; $p = 0,306$), mientras que únicamente la edad de curado tuvo un efecto concluyente sobre f_c ($F = 54,21$; $p = 9,80 \times 10^{-7}$). La interacción Edad×Mezcla tampoco fue significativa ($F = 0,03$; $p = 0,968$). La prueba de Tukey confirmó que, en ninguna de las edades evaluadas (7, 14 y 28 días), la diferencia entre el concreto patrón y el modificado alcanza significancia estadística, por lo que los incrementos observados deben interpretarse como tendencias favorables más que como mejoras mecánicas concluyentes. Esta limitación está directamente relacionada con el tamaño muestral reducido ($n = 3$ probetas por condición en las tablas originales) y con la alta variabilidad observada en la mezcla modificada a 28 días ($CV = 9,00\%$), lo que reduce la potencia estadística de las comparaciones. La menor magnitud del incremento en compresión respecto a lo reportado en la literatura es coherente con la dosificación conservadora de fibras empleada (15 kg/m^3), que según Mármol et al. [18] genera incrementos más pronunciados a mayores porcentajes de fibra.

Resultados del ensayo de resistencia a la flexión

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión correspondientes a vigas ensayadas a los 7 y 28 días de curado se presentan en la Tabla XI. Se observa que el concreto permeable modificado con fibras de acero presentó un comportamiento superior frente a esfuerzos de flexión en comparación con el concreto permeable convencional, especialmente a la edad de 28 días.

La ACI 522R-10 [14] señala que el concreto permeable presenta, en general, valores de resistencia a la flexión inferiores a los del concreto convencional, debido a su menor contenido de pasta cementicia. En este contexto, la incorporación de fibras de acero contribuyó a mejorar el comportamiento postfisuración del material, permitiendo una mayor redistribución de esfuerzos y un incremento en la capacidad resistente frente a flexión. Este efecto es particularmente relevante en concretos permeables destinados a pavimentos, donde la resistencia a la flexión es un parámetro de diseño importante.

Asimismo, se evidenció que la resistencia a la flexión aumenta con el tiempo de curado y mantiene una relación directa con la resistencia a la compresión, lo cual coincide con el comportamiento general descrito en la ACI 522R-10 [14] y

refuerza la necesidad de evaluar ambas propiedades de manera conjunta.

La resistencia a la flexión constituye el resultado más destacado del estudio, ya que en este caso las diferencias entre el concreto patrón y el modificado son estadísticamente significativas y consistentes en ambas edades evaluadas. A los 7 días, la mezcla modificada alcanzó 37,70 kg/cm² frente a 31,72 kg/cm² del patrón, un incremento del 18,86%; a los 28 días, los valores fueron 59,73 kg/cm² y 56,36 kg/cm² respectivamente, con un incremento del 5,98%. Los coeficientes de variación bajos (1,89% a 4,08%) confirman la alta uniformidad de los resultados. El ANOVA bifactorial mostró que tanto la edad ($F = 891,73$; $p < 0,0001$) como el tipo de mezcla ($F = 50,81$; $p = 0,0019$) son factores estadísticamente significativos, y que la interacción Edad×Mezcla resulta marginalmente significativa ($F = 7,93$; $p = 0,0476$), indicando que el efecto de las fibras sobre la flexión es más pronunciado a edades tempranas y se atenúa conforme avanza el curado. Estos resultados son coherentes con lo documentado por Singh et al. [18], quienes reportaron incrementos del 21,5% en flexión con fibras de acero de extremo ganchudo al 1,5% en volumen, y con Liu et al. [20], quienes obtuvieron mejoras del 21% con fibra al 1%.

La prueba de Tukey confirmó que las diferencias entre patrón y modificado son significativas en ambas edades (p -ajustada = 0,0021 a 7 días y 0,0198 a 28 días), y que todos los incrementos por efecto del curado (tanto en patrón como en modificado) resultan altamente significativos ($p < 0,0001$). La incorporación de fibras DRAMIX 3D contribuyó a mejorar el comportamiento postfisuración del material, permitiendo una mayor redistribución de esfuerzos y un incremento en la capacidad resistente frente a flexión, aspecto particularmente relevante para concretos permeables destinados a pavimentos sometidos a cargas de tránsito, donde la resistencia a la flexión es el parámetro de diseño fundamental. Este comportamiento está respaldado por la ficha técnica de Bekaert para fibras DRAMIX tipo 3D, que indica que su principal aporte se manifiesta desde edades tempranas en el control de fisuras y en la resistencia a la flexión postfisuración.

Discusión comparativa de resultados

De manera general, los resultados obtenidos demuestran que es posible mejorar el desempeño mecánico del concreto permeable mediante el uso combinado de un aditivo superplastificante y fibras de acero, sin comprometer su capacidad de infiltración. La ACI 522R-10 [14] establece que el diseño del concreto permeable debe buscar un equilibrio entre resistencia mecánica y funcionalidad hidráulica, criterio que fue alcanzado en las mezclas evaluadas en el presente estudio.

El uso del aditivo superplastificante permitió optimizar la relación agua-cemento y mejorar la cohesión interna de la

mezcla, mientras que las fibras de acero aportaron principalmente al incremento de la resistencia a la flexión y al control de la fisuración. En conjunto, estos resultados respaldan la viabilidad del concreto permeable modificado como una alternativa técnica adecuada para pavimentos urbanos de tránsito ligero a moderado, en concordancia con las recomendaciones establecidas por la ACI 522R-10 [14].

IV. CONCLUSIONES

La incorporación combinada del superplastificante SikaCem y las fibras de acero DRAMIX® 3D produjo efectos diferenciados sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable, los cuales deben ser interpretados a la luz de los análisis estadísticos realizados.

La resistencia a la compresión de la mezcla modificada alcanzó valores medios superiores a los del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días de curado, con un incremento del 1,8% a los 28 días (186.31 kg/cm² frente a 182.96 kg/cm²). Sin embargo, el análisis ANOVA bifactorial indicó que el factor *tipo de mezcla* no resultó estadísticamente significativo ($F = 1.14$; $p = 0.306$), y la prueba de Tukey confirmó que no existen diferencias significativas entre ambas mezclas en ninguna de las edades evaluadas. Por lo tanto, la mejora observada en resistencia a la compresión debe interpretarse como una tendencia favorable no concluyente, atribuible probablemente a la reducción del contenido de agua mediante el superplastificante, pero sin respaldo estadístico suficiente con el tamaño muestral empleado.

La resistencia a la flexión a diferencia de la compresión, la mezcla modificada presentó un desempeño superior estadísticamente significativo. A los 28 días, la resistencia a la flexión alcanzó 59.73 kg/cm² frente a 56.36 kg/cm² del concreto patrón (incremento del 6.0%). El ANOVA mostró que tanto la *edad* ($F = 891.73$; $p < 0.0001$) como el *tipo de mezcla* ($F = 50.81$; $p = 0.0019$) son factores significativos. La incorporación de fibras de acero DRAMIX® 3D mejoró el comportamiento post-fisuración y la redistribución de esfuerzos, constituyendo el principal aporte estructural de la modificación propuesta.

El coeficiente de permeabilidad se redujo de 0.030 m/s en el concreto patrón a 0.019 m/s en la mezcla modificada a los 28 días (reducción del 36.7%). El análisis estadístico confirmó que el *tipo de mezcla* es el factor más determinante sobre la permeabilidad ($F = 390.94$; $p \approx 10^{-24}$), con diferencias significativas en todas las edades evaluadas. Si bien el valor obtenido se mantiene dentro de los rangos aceptables establecidos por ACI 522R-10 para pavimentos permeables de tránsito ligero a moderado, la reducción del 36.7% representa una pérdida considerable de capacidad de infiltración, lo que constituye una limitación importante para aplicaciones donde la permeabilidad es el requisito principal.

El Balance mecánico-hidráulico, los resultados evidencian un *trade-off* entre el desempeño mecánico y la capacidad de infiltración. La mejora en flexión (estadísticamente

significativa) y la tendencia favorable en compresión (no significativa) se lograron a expensas de una reducción sustancial de la permeabilidad. Por lo tanto, la mezcla modificada con superplastificante SikaCem y fibras de acero DRAMIX® 3D es técnicamente viable exclusivamente para pavimentos urbanos de tránsito ligero donde el requisito de infiltración no sea crítico, siempre que se acepte explícitamente esta compensación.

Como limitaciones del estudio, los resultados deben interpretarse con cautela debido a el uso de un permeámetro de fabricación artesanal sin calibración formal según norma, el tamaño muestral reducido que limita la potencia estadística, especialmente en compresión, y la imposibilidad de aislar el efecto individual del superplastificante y las fibras de acero, al haber sido evaluados conjuntamente.

Como recomendaciones para investigaciones futuras, se sugiere ampliar el tamaño muestral, validar el permeámetro con métodos normalizados, evaluar dosis variables de fibra y superplastificante de manera factorial para aislar sus efectos individuales, e incorporar ensayos de durabilidad a largo plazo bajo condiciones ambientales reales.

REFERENCIAS

- [1] T. Aoki, "Concrete in sustainable urban development," 360 en Concreto, 2009. [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com>
- [2] 360 en Concreto, "Concreto permeable: Desarrollo urbano de bajo impacto," 360 en Concreto, 2024. [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com>
- [3] F. E. Gallo and J. Murga, "Evaluación de la resistencia a compresión y permeabilidad del concreto permeable $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, usando el aditivo Sikament-290N con agregados de la cantera del Río Chonta," Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe>
- [4] R. Fernández, "Desempeño mecánico e hidráulico del concreto permeable en aplicaciones urbanas," Infraestructura Vial, 2011.
- [5] Repositorio TEC, "Análisis del módulo de ruptura y flexión del concreto permeable," 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.tec.mx>
- [6] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 400.012: Análisis Granulométrico del Agregado Fino, Grueso y Global. Lima, Perú: INACAL, 2018.
- [7] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.185: Método de Ensayo Normalizado para Contenido de Humedad Total Evaporable de Agregados por Secado. Lima, Perú: INACAL, 2013.
- [8] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 400.017: Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Masa por Unidad de Volumen o Densidad (Peso Unitario) y los Vacíos en los Agregados. Lima, Perú: INACAL, 2011.
- [9] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 400.021: Método de Ensayo Normalizado para la Densidad, la Densidad Relativa (Peso Específico) y Absorción del Agregado Grueso. Lima, Perú: INACAL, 2013.
- [10] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 334.009: Cementos. Cemento Portland. Requisitos. Lima, Perú: INACAL, 2016.
- [11] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.183: Práctica Normalizada para la Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Laboratorio. Lima, Perú: INACAL, 2013.
- [12] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.184: Determinación de la Temperatura del Concreto Hidráulico Recién Mezclado. Método de Ensayo. Lima, Perú: INACAL, 2021.
- [13] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.035: Método de Ensayo para la Medición del Asentamiento del Concreto con el Cono de Abrams. Lima, Perú: INACAL, 2010.
- [14] ACI Committee 522, ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2010.
- [15] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.034: Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en Muestras Cilíndricas. Lima, Perú: INACAL, 2015.
- [16] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.078: Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Flexión del Concreto en Vigas Simplemente Apoyadas con Cargas a los Tercios del Tramo. Lima, Perú: INACAL, 2012.
- [17] J. Chen et al., "Effects of Superplasticizer Dosage on Cement Slurry Rheological Properties and Pore Structure of Pervious Concrete," Construction and Building Materials, Elsevier, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.016058>
- [18] V. Mármol et al., "Desempeño de concreto permeable con refuerzo de fibras de acero recicladas," in Proc. CONPAT 2025, Alconpat Internacional, 2025. [Fibers – Technical Data Sheet," Bekaert Construction, 2024. [Online]. Available: <https://construction.bekaert.com>
- [19] S. K. Singh, P. Munjal, and N. Thammishetti, "Characterization of Steel Fiber Reinforced Pervious Concrete for Pavement Applications," in Proc. Int. Conf. on Transportation and Development, ASCE, 2018, pp. 80–90. [Online].
- [20] Z. Liu et al., "Mechanical Properties of High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber and Glass Fiber," Research Article, 2025. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/791824193>