

Analysis of the Properties of Compacted and Uncompacted Permeable Concrete with Different Types of Coarse Aggregate and 10% Fine Aggregate for its application in road structures

Carrión Rabanal, Katia Nataly, Ing¹, Olivares Cruzado, Sharon Evelin², Chuquiruna Pérez, Frank Lui³, Barrantes Guevara, Ghian Piero⁴, Aguilar Cabrera, Milagro Jhenyfer⁵, Hernández Cerna, Jhonatan⁶

^{1,3,5} Universidad Privada del Norte, Perú, katia.carrion@upn.edu.pe, N00311813@upn.pe, N00333941@upn.pe.

^{2,4,6} Universidad Privada del Norte, Perú, N0037353@upn.pe, N00323300@upn.pe, N00328835@upn.pe

Abstract – The objective of this study was to analyze and compare the characteristics of pervious concrete with a compressive design strength of 260 kg/cm² with a total of 10 different mixtures such as: 8 concrete mixtures (4 compacted and 4 uncompacted, with coarse aggregate (3/8", 1/2" and 3/4") excluding fine aggregate); and 2 mixtures (1 compacted and 1 uncompacted, with 3/4" coarse aggregate and 10% fine aggregate), producing a total of 32 pervious concrete specimens (Tables III, IV, V and VI). In addition, 3 standard specimens of conventional concrete were made with 1/2" aggregate with dimensions of 15cm x 30cm, of equal design strength (260 kg/cm²). Subsequently, after 35 specimens were tested after an age of 28 days, permeability and indirect tensile strength tests were carried out. The results showed significant variations in terms of permeability and tensile strength in the compacted and uncompacted specimens. In the non-compacted specimens, it was evident that: the permeable concrete made with 3/4" coarse aggregate showed greater permeability due to the larger particle size, with a permeability coefficient of 1.78 cm/s and a tensile strength of 796.11 KPa. As for the specimens with 1/2" aggregate, they had a permeability coefficient of 1.56 cm / s and a tensile strength of 887.89 KPa, while the 3/8" specimens had a permeability coefficient of 1.50 cm / s and a tensile strength of 1046.47 KPa, finally, the 3/4" specimens with 10% fine aggregate had a permeability coefficient of 1.42 cm / s and a resistance of 1026.43 KPa. As for the compacted specimens, they did not present permeability because they did not have enough pores through which water could filter, however, with respect to resistance, the 3/4" specimens presented high values reaching 1714.84 KPa, the 1/2" specimens reached a resistance of 1269.92 KPa, 3/8" specimens with a strength of 1656.26 KPa and 3/4" specimens with 10% fine aggregate reached a strength of 1992.49 KPa. In conclusion, this study provides a series of alternatives for the design of pervious concrete which can be used according to the specific requirements of each project, however, the analysis with respect to conventional concrete reveals that the most appropriate pervious concrete to cover the structural requirements would be non-compacted concrete with 1/2" coarse aggregate and 3/8" without fine aggregate, which in turn ensure an adequate permeability coefficient.

Keywords: Permeability, Permeable concrete, Compaction, Tensile, Strength

Análisis de las Propiedades del Concreto Permeable Compactado y No Compactado con Diferentes Tipos de Agregado grueso y un 10% de Agregado Fino para su aplicación en estructuras viales

Carrión Rabanal, Katia Nataly, Ing¹, Olivares Cruzado, Sharon Evelin², Chuquiruna Pérez, Frank Lui³, Barrantes Guevara, Ghian Piero⁴, Aguilar Cabrera, Milagro Jhenyfer⁵, Hernández Cerna, Jhonatan⁶

^{1,3,5} Universidad Privada del Norte, Perú, katia.carrion@upn.edu.pe, N00311813@upn.pe, N00333941@upn.pe.

^{2,4,6} Universidad Privada del Norte, Perú, N0037353@upn.pe, N00323300@upn.pe, N00328835@upn.pe

Resumen – *EL objetivo de este estudio fue analizar y comparar las características del concreto permeable de resistencia de diseño a compresión de 260 kg/cm² con un total de 10 diferentes mezclas tales como: 8 mezclas de concreto (4 compactadas y 4 sin compactar, con agregado grueso (3/8", 1/2" y 3/4") sin incluir agregado fino); y 2 mezclas (1 compactada y 1 sin compactar, con agregado grueso de 3/4" y con 10% de agregado fino), elaborando un total de 32 especímenes de concreto permeable (Tablas III, IV, V y VI). Además, se realizaron 3 especímenes patrón de concreto convencional con agregado de 1/2" de dimensiones de 15cm x 30cm, de igual resistencia de diseño (260 kg/cm²). Para posteriormente a los 35 especímenes después de una edad de 28 días, realizar ensayos de permeabilidad y resistencia a la tracción indirecta. Los resultados mostraron variaciones significativas en cuanto a permeabilidad y resistencia a la tracción en los especímenes con y sin compactar, en los especímenes no compactados se evidenció que: el concreto permeable elaborado con agregado grueso de 3/4" presentó mayor permeabilidad debido al mayor tamaño de las partículas, con un coeficiente de permeabilidad de 1.78 cm/s y una resistencia a la tracción de 796.11 KPa. En cuanto a los especímenes con agregado de 1/2" presentaron un coeficiente de permeabilidad de 1.56 cm/s y una resistencia a la tracción de 887.89 KPa, mientras que los especímenes de 3/8" presentaron un coeficiente de permeabilidad de 1.50 cm/s y una resistencia a la tracción de 1046.47 KPa, por último, los especímenes de 3/4" con 10% de agregado fino presentaron un coeficiente de permeabilidad de 1.42 cm/s y una resistencia de 1026.43 KPa. En cuanto a los especímenes compactados, no presentaron permeabilidad debido a que no tenían poros suficientes por los que pueda filtrar el agua, sin embargo, con respecto a la resistencia los especímenes de 3/4" presentaron valores elevados llegando a 1714.84 KPa, los especímenes de 1/2" alcanzaron una resistencia de 1269.92 KPa, los especímenes de 3/8" con una resistencia de 1656.26 KPa y los especímenes de 3/4" con 10% de agregado fino alcanzaron una resistencia de 1992.49 KPa. En conclusión, este estudio proporciona una serie de alternativas para el diseño del concreto permeable las cuales podrán ser utilizadas según los requerimientos específicos de cada proyecto, sin embargo, el análisis con respecto a un concreto convencional, nos revela que los concretos permeable más adecuados para cubrir los requisitos*

estructurales sería el concreto no compactado con agregado grueso de 1/2" y el de 3/8" sin agregado fino, los cual aseguran a su vez un coeficiente de permeabilidad adecuado.

Palabras clave: *Permeabilidad, Concreto permeable, Compactación, Tracción Indirecta, Resistencia.*

I. INTRODUCCION

El concreto permeable conocido también como concreto poroso se ha convertido en una solución innovadora y sostenible para la gestión del agua en lugares urbanos, este concreto se caracteriza principalmente por su capacidad para permitir el paso del agua a través de él, lo que hace a este concreto una opción ideal para aplicaciones donde la infiltración del agua para evitar problemas como la escorrentía superficial es muy importante. El incremento de la preocupación por el cambio climático y la urbanización resalta la necesidad de sistemas de pavimentación que no solo proporcionen resistencia y durabilidad, sino que también sean amigables con el medio ambiente buscando beneficios para el aprovechamiento de las aguas pluviales. Estudios recientes han demostrado que este material es efectivo para controlar la contaminación del agua, actuando como una barrera reactiva permeable que puede filtrar y tratar el agua antes de que este alcance los cuerpos de agua subterráneos [1].

En este estudio se analiza la capacidad de filtración y la resistencia a la tracción del concreto permeable con diferentes tamaños de agregado (3/8", 1/2" y 3/4"), con la finalidad de evaluar el desempeño en términos de permeabilidad y resistencia a la tracción indirecta, la importancia de este estudio radica en los beneficios del concreto permeable y como este puede contribuir significativamente a la gestión sostenible del agua pluvial, permitiendo su recolección y reutilización, así como la recarga de acuíferos y reduciendo inundaciones en áreas urbanas [2].

En términos de resistencia, el concreto permeable presenta un desafío, ya que la incorporación de grandes vacíos puede comprometer su integridad estructural. Sin embargo, investigaciones han avanzado en la optimización de la mezcla de concreto permeable para balancear adecuadamente la permeabilidad y la resistencia, haciendo posible su uso en una variedad de aplicaciones estructurales [3].

El concreto permeable no solo nos ofrece beneficios hidráulicos, sino que también contribuye a la mejora del medio ambiente urbano ya que ayuda a la reducción del efecto isla de calor, la disminución de la contaminación del agua y la mejora de la calidad del aire estas son algunas de las ventajas más resaltantes del concreto permeable [4].

Así mismo, la implementación del concreto permeable promueve el desarrollo de nuevas infraestructuras verdes y sostenibles, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y cuidado del medio ambiente propuestos por diversas organizaciones internacionales. Además, la implementación de concreto permeable en áreas urbanas ayuda a reducir la carga sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales y mejora la calidad del agua [5].

Este trabajo tiene como objetivo principal estudiar y analizar la influencia de los diferentes tamaños de agregados en las propiedades mecánicas y de permeabilidad del concreto permeable. La metodología de este estudio incluye ensayos de permeabilidad y resistencia a la tracción indirecta del concreto lo que nos proporcionó datos cruciales para determinar el tipo de agregado más efectivo para elaborar concreto permeable. Los resultados de este estudio ofrecerán una base sólida para la aplicación del concreto permeable en proyectos de infraestructura urbana promoviendo prácticas constructivas más sostenibles [6].

II. MATERIALES Y METODOS

Los materiales utilizados para este estudio fueron, agregados gruesos de 3/8", 1/2" y 3/4" de la Provincia de Cajamarca, cemento Tipo UG y agua potable.

Para realizar el Diseño de Mezcla (ACI 522R-10) es necesario conocer las propiedades de todos los materiales, como se muestra a continuación.

TABLA I
PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS

Material	Absorción	Análisis Granulométrico		Peso Específico	Peso Unitario Seco Compactado
	(%)	TMN	mfinura	(kg/m3)	(kg/m3)
Agregado de 3/8"	2.83%	3/8"	6.6	2640	1545.13
Agregado de 1/2"	5.08%	1/2"	6.9	2620	1402.75
Agregado de 3/4"	1.60%	3/4"	7.02	2647	1638.15
Agregado fino	5.55%		2.8	2720	1562.31

El cemento Tipo UG y el agua, tienen pesos específicos de 2980 kg/m³ y 1000 kg/m³, respectivamente; asimismo, los agregados tienen las propiedades que se muestran en la TABLA I.

Para iniciar con el diseño de mezcla debemos elegir la resistencia de diseño en este caso es 260 kg/cm² (3700 psi), para determinar el contenido de aire o porcentaje de vacíos, que relaciona el siguiente cuadro del ACI 522R-10.

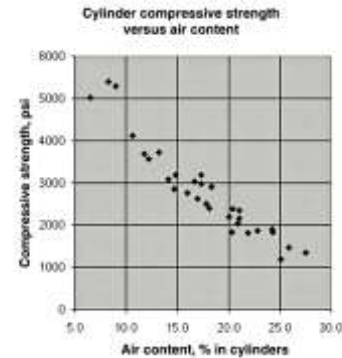


Fig. 1 Figura 5.1 del ACI 522R-10, relación entre la resistencia a la compresión (psi) y el contenido de aire (%).

Como la resistencia es 3700 psi, el porcentaje de vacíos es entre 15%-20%, para este diseño se utilizó el 15% de vacíos.

Para determinar la relación agua-cemento (a/c), igual a 0.45, se utilizó el 15% de vacíos, calculado anteriormente; y se ha utilizado el siguiente cuadro del ACI 522R-10.



Fig. 2 Figura 5.3 del ACI 522R-10, relación entre el contenido de aire y la relación agua cemento (a/c).

Para calcular el factor b/b₀:

ACI 211.3, REPORTE DE CONCRETO PERMEABLE ACI 211.3R-02

Percent fine aggregates	ASTM C 33	ASTM C 33
	Size No. 8	Size No. 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Nota: 1 Relación entre el porcentaje de agregado fino en el diseño y el número de uso.

Debido a que se utilizó un 0% y 10% de agregado fino, y los agregados pertenecen al size (tamaño) número 67 (3/4" a No.4) los valores de b/b0 son 0.99 y 0.93, respectivamente.

Seguidamente se calcula la masa del agregado grueso en función al peso unitario compactado, el factor b/b0 y el porcentaje de absorción, como se muestra en la siguiente fórmula.

$$M. AG = PUSC \times b/b0 \times (1 + \% \text{ absorción}) \quad (1)$$

Dónde:

M. AG: masa del agregado grueso. (kg)

PUSC: peso unitario seco compactado (kg/m³).

Luego de haber obtenido la masa, se calculó el volumen del agregado.

$$Vol. AG = \frac{M. AG}{\gamma AG} \quad (2)$$

Dónde:

Vol. AG: volumen del agregado grueso. (m³)

Y AG: peso específico del agregado grueso. (kg/m³)

Seguidamente se calcula el volumen de la pasta (m³).

$$Vol. Pasta = 1m^3 - (Vol. AG + \% \text{ vacíos}) \quad (3)$$

$$Vol. Pasta = 1m^3 - (Vol. AG + \% \text{ vacíos} + \% AF) \quad (4)$$

Dónde:

AF: agregado fino.

La fórmula (3), cuando el porcentaje de agregado fino es cero, y la fórmula (4), cuando haya porcentaje de agregado, en este caso, 10%.

Luego, se calcula la masa del cemento.

$$Vol. Pasta = \frac{C}{\gamma \text{ cemento}} + \frac{a/c \times C}{\rho \text{ agua}} \quad (5)$$

Dónde:

C: masa del cemento. (kg)

a/c: relación agua-cemento.

Y cemento: peso específico del cemento. (kg/m³)

ρ agua: densidad del agua. (kg/m³)

Luego, se calcula el volumen del cemento. (m³)

$$Vol. cemento = \frac{M. cemento}{\gamma \text{ cemento}} \quad (6)$$

Dónde:

M. agua: masa del cemento. (kg)

Y cemento: peso específico del cemento. (kg/m³)

Después, se calcula la cantidad de agua (kg).

$$W = \frac{a}{c} \times C \quad (7)$$

Dónde:

W: cantidad de agua. (kg)

C: masa del cemento. (kg)

Volumen del agua (m³).

$$Vol. agua = \frac{M. agua}{\gamma \text{ agua}} \quad (8)$$

Dónde:

M. agua: masa del agua. (kg)

y agua: densidad del agua. (kg/m³)

Finalmente, se calcula el volumen del agregado fino (AF) en caso de ser necesario, dividiendo su porcentaje entre 100. Con los volúmenes obtenidos se calcula el volumen total, que debería ser 1 m³ y se calcula la cantidad de material a necesitar de acuerdo con el volumen de los moldes que se van a usar.

Para este estudio se elaboraron 32 especímenes de concreto permeable, 16 compactados y 16 no compactados, como se muestran en las siguientes tablas.

TABLA III
CANTIDAD DE ESPECÍMENES COMPACTADOS
(15cm x 30cm)

ESPECÍMENES COMPACTADOS (15cm x 20cm)			
3/4" + AF	3/8"	1/2"	3/4"
3	3	3	3

TABLA IV
CANTIDAD DE ESPECÍMENES NO COMPACTADOS
(15cm x 30cm)

ESPECÍMENES NO COMPACTADOS (15 cm x 20 cm)			
3/4" + AF	3/8"	1/2"	3/4"
3	3	3	3

TABLA V
CANTIDAD DE ESPECÍMENES COMPACTADOS
(10cm x 20cm)

ESPECÍMENES COMPACTADOS (10 cm x 20 cm)			
3/4" + AF	3/8"	1/2"	3/4"
1	1	1	1

TABLA VI
CANTIDAD DE ESPECÍMENES NO COMPACTADOS
(10cm x 20 cm)

ESPECÍMENES NO COMPACTADOS (10 cm x 20 cm)			
3/4" + AF	3/8"	1/2"	3/4"
1	1	1	1

AF: agregado fino.

Asimismo, se realizaron 3 especímenes patrón de concreto convencional con agregado de 1/2", de igual resistencia de diseño que las de concreto permeable, 260 kg/cm².

Todos los especímenes tienen una edad de 28 días y los moldes cilíndricos deberán cumplir con la ASTM C31, que indica que la relación entre el diámetro y la altura de cada molde debe ser de 1:2.

Los especímenes compactados se realizaron de acuerdo con la NTP 339.033, la cual indica que cada molde se debe

rellenar en 3 capas, compactando cada una de ellas con 25 golpes con la varilla compactadora.

Los especímenes no compactados se realizaron de acuerdo con el ACI 522R-10, que indica que en cada molde se debe rellenar solo vaciando la mezcla y tratando de acomodarla.

Pasados los 28 días se realizaron los ensayos de permeabilidad (ACI 522R-10) a los especímenes de 10 cm x 20 cm, utilizando un permeámetro. En el cual se colocaron los especímenes, para saturarlos completamente, teniendo en cuenta que el nivel del agua debe estar al nivel del tubo de salida, luego se coloca 1 litro de agua en el permeámetro, se abre la válvula y se mide el tiempo en el que se filtra el agua hasta llegar al nivel de agua inicial.



Fig. 3 Permeámetro casero.

Con la ayuda de este equipo se encontró el coeficiente de permeabilidad de cada tamaño de agregado (3/8", 1/2" y 3/4"), para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$k = \frac{A}{t} \quad (9)$$

Dónde:

k: coeficiente de permeabilidad. (cm/s)

A: altura del espécimen. (cm)

t: tiempo. (s)

Asimismo, se realizó en ensayo de Tracción Indirecta (ASTM C496-04), a los especímenes de 15 cm x 30 cm, en el cuál calculamos el esfuerzo de tensión por partidura de cada espécimen, con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (10)$$

Dónde:

T: esfuerzo de tensión por partidura, psi (Kpa)

P: carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, lbf, (KN)

l: longitud, pulg, (m)

d: diámetro, pulg, (m)

III. RESULTADOS

A. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:

TABLA VII
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA-
MUESTRAS COMPACTADAS

CONCRETO PERMEABLE COMPACTADO+ MUESTRA PATRÓN (Kpa)					
Muestra	3/4"	1/2"	3/8"	3/4" +arena	PATRÓN
P-1	1645.56	1181.35	1530.68	1649.48	1548.66
P-2	1653.26	1263.79	1570.53	2024.32	1727.59
P-3	1845.78	1364.63	1867.56	2303.68	1815.9
Promedio	1714.87	1269.92	1656.26	1992.49	1697.38

Nota: En la tabla VII se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos de resistencia a la tracción indirecta según la norma ASTM C496-04 para los especímenes compactados.



Fig. 4 Resultados gráficos obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción en especímenes compactados y la muestra patrón.

Nota: En la Fig. 4 se muestra de menor a mayor la resistencia máxima que alcanzaron los especímenes compactados en comparación a los demás, donde se puede ver que la adición de arena aumentó la resistencia considerablemente.

TABLA VIII
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA-
MUESTRAS NO COMPACTADOS

Muestra	3/4"	1/2"	3/8"	3/4" +arena	PATRÓN
P-1	626.18	593.23	812.09	793.57	1548.66
P-2	847.24	870.31	1142.68	1132.28	1727.59
P-3	914.91	1200.14	1184.63	1153.45	1815.9
Promedio	796.11	887.89	1046.47	1026.43	1697.38

Nota: En la tabla VII se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos de resistencia a la tracción indirecta según la norma ASTM C496-04 para los especímenes no compactados.



Fig. 5 Resultados gráficos que se obtuvieron del ensayo de resistencia a la tracción en especímenes No compactados y la muestra patrón.

Nota: En la Fig. 5 se muestran de menor a mayor la resistencia máxima que alcanzaron los especímenes no compactados en comparación a los demás, donde se puede ver que las muestras con arena siguen siendo las más resistentes, pero en contraste las otras varían su resistencia en comparación a las Fig.4.

TABLA IX
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA EN CONCRETO
CONVENCIONAL

CONCRETO CONVENCIONAL (Kpa)	
MUESTRA	1/2"
1	1548.66
2	1727.59
3	1815.90
PROMEDIO	1697.38

Nota: En la tabla IX se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos de resistencia a la tracción indirecta según la norma ASTM C496-04 a los especímenes de concreto convencional de resistencia 260 kg/cm² de consistencia seca



Fig.6 Resultados gráficos obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción en especímenes de concreto convencional.

Nota: En la Fig. 6 se muestran los resultados de la resistencia a la tracción de concreto convencional que se ha utilizado como muestra patrón para poder comparar los resultados de los especímenes de concreto permeable.

B. PERMEABILIDAD

TABLA X
CAPACIDAD DE PERMEABILIDAD

PERMEABILIDAD		
TMN (3/4")		
	Tiempo (s)	K
1	10.500	1.905
2	10.810	1.850
3	12.410	1.612
Promedio	11.240	1.779
TMN (1/2")		
Muestra	Tiempo (s)	K
1	13.010	1.545
2	13.240	1.518
3	12.445	1.615
Promedio	12.898	1.559
TMN (3/8")		
	Tiempo (s)	K
1	12.970	1.541
2	13.470	1.484
3	13.530	1.477
Promedio	13.323	1.500
TMN (3/4")		
	Tiempo (s)	K
1	14.250	1.411
2	14.300	1.406
3	13.850	1.451
Promedio	14.133	1.422

Nota: En la tabla X se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos de permeabilidad para los especímenes No compactados según la norma ACI 522R-10 (no se realizaron pruebas de permeabilidad a los especímenes compactados ya que no presentaban poros para el paso del agua, así como los especímenes de concreto convencional)



Fig.7 Resultados gráficos obtenidos de los ensayos de permeabilidad que nos muestra el coeficiente de permeabilidad k (cm/s) de menor a mayor de las 4 muestras de concreto permeable no compactado.



Fig.8 Imagen referencial de las muestras utilizadas con diferentes tamaños de agregados 3/4\" ,3/8\" y 1/2\" respectivamente.



Fig.9 Imagen referencial de las muestras utilizadas con agregado de 3/4\" mas un porcentaje de arena.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

TABLA XII
RESULTADOS COMPARATIVOS

Tipo de Concreto	Agregado (")	Agregado Fino (%)	Resistencia a la Tracción Indirecta (KPa)	Permeabilidad (k) (cm/s)
Convencional (patrón)	1/2	0%	1697.38	No aplica
Permeable Compactado	3/4	10%	1992.49	No aplica
	3/4	0%	1714.87	No aplica
	3/8	0%	1656.26	No aplica
	1/2	0%	1269.92	No aplica
Permeable sin Compactar	3/8	0%	1046.47	1.5
	3/4	10%	1026.43	1.422
	1/2	0%	887.89	1.558
	3/4	0%	796.11	1.779

Nota: En la tabla XI se muestran los resultados comparativos de todos los tipos de concreto que se elaboraron y los resultados obtenidos.

Luego de analizar los resultados obtenidos, se logró evidenciar que los especímenes de concreto convencional nos proporcionan una guía para poder determinar si los resultados obtenidos de los diferentes especímenes son altos o bajos, cabe resaltar que estos especímenes patrón se realizaron con agregado grueso de 1/2\" y una consistencia seca; estos dieron un resultado promedio de 1697.38 Kpa para la resistencia a la tracción indirecta y no se

les realizó prueba de permeabilidad ya que no presentan poros por los que el agua pueda filtrar.

En comparación a estos resultados, los especímenes de concreto permeable compactado presentaron valores elevados de resistencia a la tracción indirecta, como los especímenes de 3/4" con el 10% de agregado fino que presentaron el valor más alto con un promedio de 1992.49 Kpa, seguido por los especímenes de 3/4" con una resistencia promedio de 1714.87 Kpa, luego los especímenes de 3/8" con una resistencia promedio de 1656.26 Kpa y por último los especímenes de 1/2" con un promedio de 1269.92 Kpa, estos resultados indican que los especímenes de concreto permeable compactado son aún más resistentes que las probetas de concreto convencional, sin embargo, una de sus desventajas es que al ser compactado no presenta los poros característicos del concreto permeable y por ende no presenta permeabilidad, aun así nos da una buena referencia con respecto al concreto permeable ya que si se logra tener un balance entre la compactación y el porcentaje de agregado fino se podría obtener un concreto permeable de gran resistencia y considerablemente permeable.

Con respecto a los especímenes de concreto permeable sin compactar se encontró que para los de 3/4" se obtuvo una resistencia promedio de 796.11 Kpa, los especímenes de 1/2" alcanzaron una resistencia promedio de 887.89 Kpa, los especímenes de 3/8" una resistencia promedio de 1046.47 Kpa y por último los de 3/4" con 10% de agregado fino que obtuvieron un promedio de 1026.43 Kpa, estos resultados demuestran que la compactación en el concreto permeable influye mucho en su resistencia, como se observa los especímenes de agregado de 3/8" y el de 3/4" con 10% de agregado fino presentan valores cercanos a los especímenes patrón.

En cuanto a la permeabilidad se logró observar que el espécimen con agregado de 3/4" es el que presentan mayor permeabilidad con un coeficiente de permeabilidad (k) promedio de 1.779 cm/s, seguido por el espécimen de 1/2" que presentó un coeficiente de permeabilidad promedio de 1.558 cm/s, luego el espécimen de 3/8" que obtuvo un coeficiente de permeabilidad promedio de 1.500 cm/s y por último el que presentó menor permeabilidad, el de 3/4" con 10% de agregado fino que obtuvo un promedio de coeficiente de permeabilidad de 1.422 cm/s, estos resultados se deben al tamaño y distribución de las partículas de los agregados, debido que las partículas que tienen mayor tamaño en este caso el espécimen de 3/4" presenta más permeabilidad con respecto al de 3/8" que tiene partículas de menor tamaño, en contraste la de 3/4" con 10% de agregado fino, este presenta el menor coeficiente de permeabilidad, debido a que el agregado fino obstruye algunos de los poros por los que el agua debía pasar.

Aun así, con respecto a la norma ASTM C33-03 que recomienda una tasa de percolación de 0.0004cm/s o 13 mm/h en concreto permeable, los especímenes que hemos realizado tienen valores muy elevados, debido a que no fueron compactados estos generaron muchos más poros por los que el

agua pueda filtrar libremente, por ende, hace que los especímenes sean muy permeables.

Por último, luego de obtener, analizar y comparar los resultados se pudo inferir que los especímenes de concreto permeable compactado nos muestran que al compactar el concreto permeable se puede incrementar su resistencia, pero se reduce la capacidad permeable, a diferencia de los especímenes no compactados que presentan una permeabilidad muy alta, pero una resistencia baja con respecto a las compactadas. Sin embargo, se logró observar que con respecto a los especímenes patrón y a la permeabilidad, los especímenes que presentaron mejor relación entre resistencia y permeabilidad fueron los especímenes con agregado de 1/2" y 3/8".

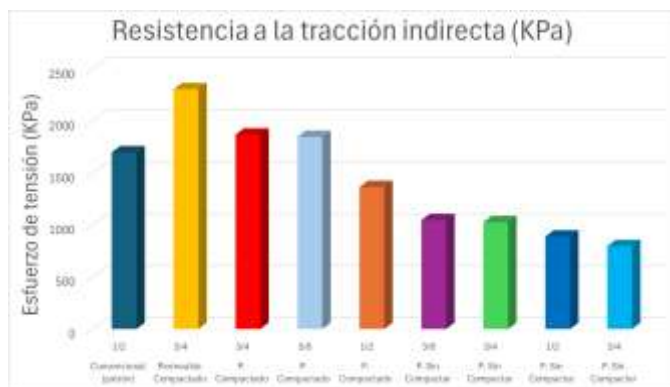


Fig.10 Grafico comparativo de los resultados de resistencia a la tracción indirecta de todos los especímenes utilizados.



Fig.10 Grafico comparativo de los resultados de permeabilidad de todos los especímenes utilizados (Los especímenes compactados y la muestra patrón no presentan permeabilidad ya que no tiene la cantidad suficiente de poros para permitir el paso del agua).

V. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados experimentales obtenidos, se concluye que el concreto permeable compactado, elaborado según la norma NTP 339.033, presenta un incremento significativo en la resistencia a la tracción indirecta, superando incluso al concreto convencional patrón en varios casos. Este efecto es particularmente notorio en las mezclas con agregado de 3/4" y 10% de agregado fino, las

cuales alcanzaron la mayor resistencia (2303.68 KPa). Sin embargo, este aumento en resistencia se produce a costa de una pérdida total de permeabilidad, ya que la compactación cierra los poros necesarios para permitir el paso del agua. Por lo tanto, este tipo de mezcla es adecuada solo en contextos donde la resistencia mecánica prime sobre la capacidad de drenaje, como en elementos estructurales secundarios o pavimentos en zonas secas.

En contraste, los especímenes de concreto permeable sin compactar mostraron una permeabilidad muy superior, con coeficientes que superan ampliamente el mínimo establecido por la norma ASTM C33-03 (0.0004 cm/s). El espécimen de 3/4" presentó el mayor coeficiente de permeabilidad (1.779 cm/s), lo que confirma que el mayor tamaño del agregado grueso favorece la generación de porosidad conectada. No obstante, esta elevada permeabilidad se obtuvo con una menor resistencia mecánica, la cual se mantuvo por debajo de los especímenes compactados y del concreto patrón. Esto indica que el concreto permeable no compactado es especialmente adecuado para superficies expuestas a grandes volúmenes de agua, como pavimentos en zonas urbanas con alta pluviosidad, ya que permite una rápida infiltración y reduce el riesgo de escorrentías superficiales.

Con respecto a la inclusión de agregado fino, se determinó que añadir un 10% a la mezcla compactada incrementa la resistencia a la tracción, pero disminuye significativamente la permeabilidad. Esto se debe a que el material fino obstruye parte de los poros por los que el agua debería circular. Por ello, se recomienda utilizar el agregado fino en proporciones menores al 10% cuando se desee conservar la capacidad de drenaje del concreto, buscando así un equilibrio entre resistencia estructural y funcionalidad hidráulica.

Al comparar los resultados con los obtenidos del concreto convencional patrón, se observa que algunas mezclas de concreto permeable, incluso en estado no compactado, alcanzan niveles de resistencia cercanos o superiores al patrón. Esto evidencia el potencial de este tipo de concreto como una alternativa sostenible y técnicamente viable, especialmente cuando se adapta su diseño a las necesidades específicas de la obra. El concreto convencional, si bien ofrece una resistencia adecuada, carece completamente de permeabilidad, lo que limita su uso en aplicaciones donde la gestión del agua superficial es crucial.

Finalmente, considerando las condiciones ambientales y geográficas de Cajamarca, se concluye que los agregados de 1/2" y 3/8" resultan ser los más adecuados para la producción de concreto permeable, debido a la favorable relación entre resistencia y permeabilidad que ofrecen. Este comportamiento se ve potenciado cuando se emplean agregados redondeados, ya que permiten una mejor formación de poros interconectados. En este sentido, el concreto permeable no compactado se presenta como una solución eficaz para pavimentos y superficies urbanas que requieren simultáneamente capacidad estructural moderada y alta eficiencia en el drenaje pluvial.

RECOMENDACIONES

Se recomienda al momento de elaborar concreto permeable tener en cuenta las especificaciones de la norma ACI 522R-10 que está especializada en concreto permeable, añadido a esto analizar correctamente las propiedades de los agregados y tomar medidas exactas al momento de pesar o calcular la cantidad de material a utilizar.

Además, tener en cuenta el grado de compactación, según la norma ASTM C33-03 el concreto permeable en pavimentos debe ser consolidado o compactado por un rodillo que tenga las dimensiones adecuadas, proporcione una fuerza vertical mínima de 0.07Mpa y pese aproximadamente entre 270 a 320 kg.

También se debe tener en cuenta, las especificaciones para las que se necesita el concreto permeable ya que según esto se puede elegir la mejor opción de tamaño de agregado y la magnitud de la compactación.

Así mismo, el mantenimiento del concreto permeable es esencial para preservar su capacidad de drenaje y durabilidad. Se recomienda realizar limpieza periódica mediante barrido, aspirado o lavado con agua a presión para evitar la acumulación de sedimentos que obstruyan los poros, el uso de selladores debe evitarse para no comprometer la permeabilidad. También es importante controlar la vegetación en la superficie para prevenir reducción en la capacidad de filtración.[7]

REFERENCIAS

- [1] R. O. Rahman, A. M. El-Kamash, y Y. T. Hung, "Permeable concrete barriers to control water pollution, A review". *Water* 15, no 21, 3867, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/w15213867>
- [2] D. D. Arana, y V.O. Portuguese, "Diseño de un concreto permeable utilizando plástico reciclado en ciclovías de la vía Costa Verde", Tesis de grado, Fac. de Ingeniería. UPC, Lima, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/668090>
- [3] J. Kim, S. H. Han, y K. Ra, "A review of pervious concrete as a novel pavement sustainable and environmental material". *Materials*, 9(11), 901. 2016. doi: <https://doi.org/10.3390/ma9110901>
- [4] U. J. Bendezu, y D. G. Llerena, "Estudio de la capacidad de filtración y resistencia del concreto permeable", Tesis de grado, Fac. de Ingeniería. UNI, Lima, Perú, 2023.
- [5] B. Xixuan, Z. Heng, B. Xiaoya, C. Xuyong, y R. Chengqiang, "Compressive Strength, Permeability, and Abrasion Resistance of Pervious Concrete Incorporating Recycled Aggregate". *Sustainability* 16, no. 10, 4063. Mayo de 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/su16104063>
- [6] Ore, A. H. "Evaluación de la permeabilidad y resistencia del concreto permeable con diferentes tamaños de agregado" Tesis de grado, Fac. de Ingeniería. ULIMA, Lima, Perú, 2024.
- [7] C. E. Amorós, y J. C. Bendezu, "Diseño de mezcla de concreto permeable para la construcción de la superficie de rodadura de un pavimento de resistencia de 210 kg/cm²". Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Departamento de ingeniería civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, 2019. Recuperado de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626313/BENDEZU_UJ.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [8] American Concrete Institute (2010). Norma Concreto Permeable ACI 522R-10.
- [9] American Concrete Institute. Hormigón permeable C33-03 Reportado por el Comité ACI 522.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C496 Ensayo Esfuerzo de Tensión
- [11] American Concrete Institute(2002). Dosificación de mezclas de hormigón ACI 211.1
- [12] American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D448 números de tamaño de agregado y los rangos de tamaño estándar para los análisis de tamiz mecánico de agregado grueso.