

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Evaluación de las propiedades en Concretos Permeables con  
Escoria de Cobre y Microesferas de Vidrio para pavimentos  
especiales**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

**Autores:**

Jarol Kevin Cruz Mayta  
Roy Gilber Ccarita Ccarita

**Asesor:**

Mg. Edwin Parillo Escarsena

**Juliaca, setiembre de 2024**



## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Edwin Parillo Escarsena, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN CONCRETOS PERMEABLES CON ESCORIA DE COBRE Y MICROESFERAS DE VIDRIO PARA PAVIMENTOS ESPECIALES.”** de los autores **Jarol Kevin Cruz Mayta y Roy Gilber Ccarita Ccarita**, tiene un índice de similitud de 15 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca a los 03 días del mes de Octubre del año 2024.



Mg. Edwin Parillo Escarsena

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 05 día(s) del mes de setiembre del año 2024 siendo las 14:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del

(de la) presidente(a): Mtro Leonel Chahuores Paucar el (la) secretario(a): Mg. Jose Pacori

Pacori y los demás miembros: Mg Arnaldo

Pabui Galaza y el (la) asesor(a) Mg Edivin Parillo

Escarsena con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

'Evaluación de las propiedades en Concreto Permeables con Escoria de Cobre y Microesferas de Vidrio para pavimentos especiales'

del(los) bachilleres: a) Jarol Kevin Cruz Mayta

b) Roy Gilber Escarita Escarita

c) \_\_\_\_\_

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil  
(Categorización del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Jarol Kevin Cruz Mayta

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Roy Gilber Escarita Escarita

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>aceptable</u>	<u>Bueno</u>

Bachiller (c): \_\_\_\_\_

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior  
Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]  
 Presidenta  
[Firma]  
 Asesora  
[Firma]  
 Bachiller (a)

[Firma]  
 Miembro  
[Firma]  
 Bachiller (b)

[Firma]  
 Secretario/a  
 \_\_\_\_\_  
 Miembro  
 \_\_\_\_\_  
 Bachiller (c)

**ÍNDICE GENERAL**

ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE ANEXOS .....	VII
Resumen .....	VIII
Abstract .....	IX
I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. MARCO TEÓRICO .....	13
III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS.....	15
A. Diseño Metodológico .....	15
B. Materiales .....	15
C. Diseño de mezcla.....	16
D. Preparación del espécimen .....	17
1) Resistencia a la compresión .....	18
2) Resistencia a flexión .....	18
3) Permeabilidad .....	19
4) Contenido de vacíos.....	20
5) Aislador térmico.....	20
IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN .....	21
V. CONCLUSIONES.....	32
VI. RECOMENDACIONES .....	33
VII. REFERENCIAS .....	34

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Propiedades de cemento y agregados.....	17
Tabla 2: Especímenes de mezcla de concreto permeable.....	18
Tabla 3: Análisis de varianza con nivel de significancia, $\alpha=0.05$ .....	22
Tabla 4: Comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.....	23
Tabla 5: Análisis de varianza con nivel de significancia $\alpha=0.05$ .....	24
Tabla 6: Comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.....	25
Tabla 7: Análisis de varianza con nivel de significancia $\alpha=0.05$ .....	26
Tabla 8: Comparación de varianza con una confianza de 95 % - Tukey .....	27
Tabla 9: Análisis de varianza con nivel de significancia $\alpha=0.05$ .....	28
Tabla 10: Comparación de varianza con una confianza de 95 % - Tukey .....	29
Tabla 11: Análisis de varianza con nivel de significancia $\alpha=0.05$ .....	30
Tabla 12: Comparación de varianza con una confianza de 95 % - Tukey .....	31

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Granulometría de agregado grueso .....	16
Figura 2: Prueba cono de Abrams .....	17
Figura 3: Ensayo de resistencia a la compresión y a la flexión.....	19
Figura 4: Ensayo de permeabilidad, contenido de vacíos y aislador térmico. ....	21
Figura 5: Fuerza de compresión .....	22
Figura 6: Resistencia a la flexión .....	24
Figura 7: Permeabilidad .....	26
Figura 8: Contenido de vacíos.....	28
Figura 9: Aislador térmico .....	30

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo A. Evidencia de la sumisión de la tesis .....	37
Anexo B. Copia de resolución .....	38
Anexo C. Constancia de ensayos .....	39
Anexo D. Instrumentos utilizados.....	40

# Evaluación de las propiedades en Concretos Permeables con Escoria de Cobre y Microesferas de Vidrio para pavimentos especiales. Evaluation of the properties of Permeable Concrete with Copper Slag and Glass Microspheres for special pavements.

Jarol Kevin Cruz Mayta<sup>1</sup>, Roy Gilber Ccarita Ccarita<sup>2</sup>, Edwin Parillo Escarsena<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Peruana Unión, Puno - Perú, <sup>2</sup>Universidad Peruana Unión, Cusco – Perú

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3114-4889> - <https://orcid.org/0009-0007-2471-6977> - <https://orcid.org/0000-0003-1175-0512>

**Resumen**— Actualmente existe muchos impedimentos al distribuir las aguas pluviales en las zonas con una superficie plana es uno de los problemas actuales, ya que las inundaciones o encharcamientos se generan por la gran impermeabilidad que es característico del pavimento convencional en pendientes bajas. El cometido del trabajo se centró en tasar si la sustitución de microesferas de vidrio y escoria de cobre al agregado fino del concreto permeable mejoraría sus características mecánicas, hidráulicas y físicas. El estudio se caracteriza con un diseño experimental, con un enfoque cuantitativo y el tipo de investigación es aplicada. Se elaboraron muestras con diferentes proporciones de estos sustitutos y se realizaron ensayos de esfuerzo a compresión, flexión, permeabilidad, cantidad de vacíos y conductividad térmica siguiendo normas ASTM y ACI. Los resultados mostraron que el diseño con 5% de escoria de cobre y 5% de microesferas de vidrio (espécimen 2) fue el más óptimo para pavimentos especiales, proporcionando un equilibrio adecuado entre los resultados promedios, de la resistencia a compresión con un 210,03 kg/cm<sup>2</sup>, resistencia a flexión con un 25.1 kg/cm<sup>2</sup>, permeabilidad con un coeficiente de 0.226 cm/s, contenido de vacíos con un 16.26 % y baja conductividad térmica con una diferencia de 4.867 °C, cumpliendo con los requisitos establecidos por la recomendación de ACI 522R-10.

**Palabras Clave:** Concreto permeable, escoria de cobre, microesferas de vidrio, pavimentos especiales.

**Abstract**— Currently, there are many impediments when distributing rainwater in areas with a flat surface. It is one of the current problems, since flooding or ponding is generated by the great impermeability that is characteristic of conventional pavement on low slopes. The purpose of the work focused on assessing whether the replacement of glass microspheres and copper slag to the fine aggregate of pervious concrete would improve its mechanical, hydraulic and physical characteristics. The study is characterized by an experimental design, with a quantitative approach and the type of research is applied. Samples were prepared with different proportions of these substitutes and compression stress, bending, permeability, number of voids and thermal conductivity tests were carried out following ASTM and ACI standards. The results showed that the design with 5% copper slag and 5% glass microspheres (specimen 2) was the most optimal for special pavements, providing an adequate balance between the average results of compressive strength with a 210, 03 kg/cm<sup>2</sup>, flexural strength with 25.1 kg/cm<sup>2</sup>, permeability with a coefficient of 0.226 cm/s, void content with 16.26% and low thermal conductivity with a difference of 4.867 °C, meeting the requirements established by the recommendation of ACI 522R-10.

**Keywords:** Permeable concrete, copper slag, glass microspheres, special pavements.

## I. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos meteorológicos extremos, como las fuertes lluvias y precipitaciones de granizo, han causado importantes problemas en las infraestructuras viarias en las últimas décadas, sobre todo en ciudades con baja pendiente en su superficie. Durante estos incidentes, la presencia de agua en las aceras ha alterado gravemente los patrones de tráfico tanto de coches como de peatones, aumentando el riesgo de inundaciones, daños materiales y problemas de seguridad pública. El cambio climático y la creciente urbanización han agravado este problema al aumentar la frecuencia y gravedad de estos sucesos catastróficos. A pesar de los esfuerzos para mejorar la infraestructura, la infraestructura vial convencional sigue siendo vulnerable a condiciones climáticas extremas. En muchos entornos urbanos, el uso del hormigón permeable ha crecido significativamente. El hormigón permeable tiene ciertas ventajas a la hora de gestionar el agua, pero uno de sus principales inconvenientes es su resistencia, sobre todo cuando se utiliza en pavimentos muy transitados [1].

La construcción de vías, principalmente en entornos urbanos, describen criterios de accesibilidad y resistencia, sin considerar el impacto social en lugares donde hay bastantes precipitaciones acuosas, ocasionando problemáticas en la planificación y administración para enfrentar daños creados por las inundaciones. La tendencia hacia la implementación de pavimentos rígidos permeables, que promueven un sistema innovador va relacionado a la mejora del drenaje pluvial y el respeto del entorno ambiental [2].

En comparación con el hormigón permeable tradicional, la adición o sustitución de componentes en los pavimentos de hormigón permeable afecta significativamente a sus propiedades estructurales e hidráulicas, modificando su capacidad para absorber tensiones y manejar el agua de lluvia. En este contexto, la inclusión de estos materiales puede tener un impacto en la resistencia y la capacidad de carga del pavimento. Por ejemplo, puede reforzar la durabilidad y la resistencia a esfuerzos al hormigón permeable, mientras que otros materiales pueden ayudar a reducir la gravedad específica del hormigón y hacerlo más manejable. Como resultado, la estructura puede volverse más fuerte y resistente a las fuerzas que se ejercen sobre ella [3].

Los materiales adherentes pueden influir en la permeabilidad del hormigón permeable. Para evitar una pérdida excesiva de resistencia, la porosidad que permite el paso del agua es una característica deseable en el hormigón permeable. Sin embargo, debe ser equilibrada. Mediante la sustitución de estos materiales, la porosidad puede ser controlada, lo que permite la infiltración de agua suficiente, manteniendo la integridad estructural. La adición de materiales de unión podría aumentar en gran medida

la resistencia a los esfuerzos de compresión al hormigón. Al reforzar la cohesión de la matriz de cemento y aumentar la resistencia a los esfuerzos de compresión al hormigón, estos adherentes pueden servir como agentes de refuerzo. Esto es vital, sobre todo en ciudades con mucho tráfico de coches, donde se necesita una resistencia estructural suficiente para garantizar la longevidad del pavimento [4].

Se destacan las ventajas de utilizar hormigón permeable en los pavimentos, como la disminución de los peligros que conllevan las precipitaciones, la disminución de los gradientes de calor y humedad, y la provisión de capacidades adicionales de drenaje y ventilación. Se ha demostrado que un pavimento bien diseñado puede tener suficiente resistencia estructural. La eficiencia de filtrado del hormigón poroso no solo depende de la distribución granulométrica de los áridos. En cambio, viene determinada por la proporción de cemento y agua, así como por el nivel de consistencia alcanzado durante el proceso de producción. Garantizar la conectividad de los poros es crucial para el filtrado de las aguas pluviales continuamente a través de su superficie porosa [5]. Con la sustitución de microesferas de vidrio y escoria de cobre al agregado fino, resulta aún más importante evaluar las propiedades del hormigón permeable. Estos materiales sustituyentes pueden modificar la homogeneidad del hormigón, lo que puede repercutir en la capacidad de filtración del material.

Los pavimentos con hormigón permeable tienen la capacidad de disminuir significativamente los picos de caudal y regular la escorrentía superficial. Esto es especialmente cierto en lugares donde se han construido infraestructuras para bicicletas y donde hay una gran concentración de tráfico ligero. El uso de pavimento permeable en los carriles bici conlleva disminuciones significativas del caudal punta, que oscilan entre el 44% y el 92%, según los resultados numéricos. Estos hallazgos son particularmente relevantes en vías donde la disposición del carril bici en la base de la pendiente transversal facilita que el pavimento permeable actúe como un efectivo sistema de captación de la escorrentía superficial generada por la lluvia [6].

La búsqueda de sustitutos económicos y respetuosos con el medio ambiente en el diseño de materiales de construcción ha cobrado importancia. Un campo de investigación prometedor es el uso de microesferas de vidrio como sustitutos en la producción de hormigón. Mediante estudios se ha investigado la posibilidad de utilizar estos materiales para mejorar las características mecánicas y físicas del hormigón. En un estudio reciente se utilizaron microesferas de vidrio para desarrollar mezclas de hormigón convencionales con ajustes en el agregado fino. Los resultados mostraron que la resistencia a los esfuerzos de compresión aumenta con el incremento del contenido de microesferas de vidrio [7].

La viabilidad desde un punto de vista técnico de incorporar escoria de cobre al hormigón y explorar su posible uso como árido. La resistencia a la compresión es el principal parámetro utilizado para evaluar reemplazar la arena con escoria de cobre conlleva a una resistencia del hormigón que difiere

de la del hormigón convencional. Esto plantea la posibilidad de utilizar menos material en el hormigón y, al mismo tiempo, conseguir resistencias elevadas. Además, la escoria podría reciclarse utilizándose como agregado y adición, lo que reduciría las consecuencias medioambientales. Esta sustitución resalta el potencial de la utilización de escorias de cobre en el hormigón permeable, destacando su viabilidad técnica y sus ventajas medioambientales [8].

El principal propósito de esta investigación es evaluar las propiedades en concretos permeables con escoria de cobre y microesferas de vidrio para pavimento de tráfico liviano, con el fin de evaluar su desempeño y viabilidad como alternativas sostenibles. En tal sentido analizar la influencia que tiene la escoria de cobre y microesferas de vidrio al realizar el diseño de mezcla para un concreto permeable acorde a las exigencias de la norma ACI 522R-10. Conjuntamente elaborar una formulación de sustitución de agregado fino, explorando distintas proporciones, tales como 75 % de escoria de cobre y 25 % de microesferas de vidrio; 50 % de escoria de cobre y 50 % de microesferas de vidrio; 25 % de escoria de cobre y 75 % de microesferas de vidrio; 100 % de escoria de cobre y 100 % de microesferas de vidrio. Esto se realizará teniendo en consideración las restricciones de que solo el 10 % de agregado fino es permisible en el concreto permeable. Finalmente determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del concreto permeable con escoria de cobre y microesferas de vidrio para pavimentos especiales.

Se estima que por medio del análisis la influencia de la escoria de cobre y microesferas de vidrio en el diseño de mezcla de concreto permeable mejora la trabajabilidad, adherencia, aislador térmico y la permeabilidad. Así mismo el porcentaje adecuado para incorporar la escoria de cobre y microesferas de vidrio como sustituto de agregado fino para concreto permeable es 25 % escoria de cobre y 75 % microesferas de vidrio, generando así mejor control de permeabilidad y trabajabilidad en concreto permeable. Consecuentemente las

características físicas, mecánicas e hidráulicas del concreto permeable son eficientes para su utilidad en pavimentos de tráfico liviano con escoria de cobre y microesferas de vidrio.

## II. MARCO TEÓRICO

El concreto permeable tiene una gran porosidad que permite que el agua penetre en su estructura. Este tipo de hormigón suele aplicarse en zonas donde es preferible que la escorrentía superficial se produzca por las precipitaciones y otras fuentes que se filtran en la tierra. El concreto permeable ayuda a reducir el volumen del agua estancada en la superficie al permitir que el agua permee el pavimento y reponga los niveles de agua subterránea. Durante la creación de la matriz de concreto permeable, se incorpora un sistema de espacios abiertos para proporcionar al hormigón permeable su porosidad. Para crear estos espacios vacíos se pueden utilizar diversas técnicas, como el uso de áridos gruesos de mayor tamaño y la adición de aditivos que provocan porosidad en la construcción del hormigón. Gracias a la estructura porosa del hormigón, que permite la permeabilidad del agua, se eviten los encharcamientos superficiales, reduciendo la posibilidad de inundaciones [9].

Es esencial comprender la importancia de la proporción agua/cemento para la realización del diseño del concreto permeable, ya que esta variable tiene un impacto significativo en las resistencias y en la estructura de los vacíos del material. De acuerdo con la Norma ACI 522R-06 [10], las relaciones agua/cemento comúnmente utilizadas oscilan entre 0.26 y 0.45, sujetas al tipo de agregado y el empleo de materiales que influyen en su diseño de mezcla. En estudios experimentales, donde relaciones de 0.58, 0.46, 0.41 y 0.37 resultaron en que la pasta de cemento se desplazaría hacia el fondo, no contribuyendo a la consistencia y adhesión de la grava en la mezcla. Además, estas relaciones tapaban los poros, afectando disminuyendo los espacios de vacío del concreto. Dado que afecta directamente a las propiedades del material, la proporción agua/cemento es crucial para el diseño del hormigón poroso. Esta relación influye en la trabajabilidad, la resistencia final y la durabilidad del hormigón. Una relación agua-cemento adecuada es esencial para que el hormigón poroso alcance la permeabilidad requerida sin sacrificar la resistencia estructural. Un exceso de humectación puede provocar un incremento de la porosidad y una reducción de la resistencia, mientras que una humectación insuficiente puede producir una mezcla excesivamente seca que complique la compactación y la colocación precisa. Por lo tanto, para garantizar que el hormigón poroso satisface los requisitos de drenaje y resistencia necesarios para su aplicación en pavimentos permeables es preciso establecer el equilibrio ideal en la proporción agua/cemento.

La prueba de revenimiento consiste en llenar concreto fresco en un cono truncado de acero en etapas iguales y compactar cada capa con una barra de compactación normalizada. Después de rellenar el concreto, se saca el cono y se mide la cantidad de asentamiento que se produce. Esta medición muestra

la facilidad con la que el concreto puede manipularse, colocarse y compactarse durante la construcción. Es una medida de la trabajabilidad del concreto [11]. La consistencia del hormigón fresco puede determinarse mediante la prueba de asentamiento del hormigón permeable. El proceso consiste en verter el hormigón en un cono truncado y, a continuación, retirar gradualmente el cono para dejar que el hormigón se extienda lateralmente. La medición de la altura a la que el hormigón se desplaza desde la posición inicial del cono indica el grado de fluidez del material. Esta prueba es esencial cuando se utiliza hormigón permeable para asegurarse de que la mezcla tiene la consistencia adecuada para permitir la infiltración del agua y garantizar que los poros permeables se forman correctamente en la superficie del pavimento. El asentamiento ideal garantiza una distribución uniforme del hormigón y evita la obstrucción de los poros, que podría reducir la capacidad de drenaje del hormigón.

### III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

#### A. Diseño Metodológico

El diseño de la investigación es experimental, ya que usaremos la variable independiente para examinar la consecuencia y el vínculo que exige en la variable dependiente. El enfoque es cuantitativo ya que la obtención de resultados será mediante ensayos y mediciones numéricas. Se realizó una investigación de tipo aplicada, debido a que lo característico de este tipo de investigación es buscar la aplicación y utilizar los conocimientos, por medio de experimentos o ensayos en el centro de investigación con diseño preexperimental con preprueba y posprueba. De acuerdo al nivel de la investigación es aplicativo, puesto que el estudio analiza las propiedades de concreto permeable al sustituir agregado fino por escoria de cobre y microesferas de vidrio relativamente. El alcance de la investigación es correlacional, siendo las variables las cuales tendrán un grado de asociación y relación.

#### B. Materiales

El cemento a usar en concreto permeable es el portland, según detalla la norma ASTM C150 [12]. Como agregado grueso se empleó piedra chancada de tamaño 1/2", 3/4" y una gravilla de 4.76 mm. Las propiedades principales del cemento y agregados se presentan en la tabla 1. Las microesferas de vidrio y escoria de cobre se utilizaron como sustituto de agregado fino con la finalidad de mejorar la fuerza compresiva, módulo de rotura y permeabilidad, además de ello las microesferas de vidrio es un buen aislador térmico por las propiedades que presenta.

A partir de cenizas procedentes de residuos industriales se fabrica una microesfera de vidrio blanca y esférica. Tiene un tamaño de partícula de 50-100  $\mu\text{m}$ , una resistencia a la compresión de 407.87-611.83  $\text{kgf/cm}^2$ , escasa conductividad térmica, buena movilidad y baja densidad. Debido a sus cualidades superiores de aislamiento térmico, las microesferas de vidrio se utilizan con frecuencia como material de aislamiento térmico en el sector constructivo [13]. Debido a su superficie lisa y no porosa, el agua no puede adherirse a ellas y obstruir los poros del hormigón. Preservan la durabilidad de la mezcla, ya que son químicamente inertes y no reaccionan con otros componentes del hormigón [14]. El agua fluye más fácilmente a través de sus poros unidos debido a su forma esférica. Pueden dosificarse con precisión para regular la cantidad deseada de contenido en huecos.

Un subproducto sólido de la fundición y el refinado del cobre a partir de sus minerales se denomina escoria de cobre. Se trata de una sustancia negra con matices marrones, amorfa, granular y vítrea. Debido a su extrema dureza, la escoria de cobre aumenta la resistencia y la durabilidad y reduce la contracción por secado del hormigón [15]. En contraste con el concreto convencional, la condición

parcial del árido fino con escoria de cobre mejora la fuerza compresiva, módulo de rotura y la resistencia a la tracción por división debido a la capacidad puzolánica inherente del cobre [16].

### C. Diseño de mezcla

El concreto permeable está compuesto por mezcla cementicia y áridos. La función que cumple la mezcla cementicia es de unir los agregados. La consistencia del concreto permeable se determinó por medio de la prueba de cono de Abrams como refiere la figura 2. Teniendo en cuenta lo que refiere la normativa ACI 522R-10 acerca del asentamiento para concreto permeable es 0 cm. El contenido del agregado se determinó de acuerdo con el método b/b<sub>0</sub> (contenido de agregado/densidad de empaquetamiento de agregado seco) referido por ACI 522R-10, teniendo en cuenta estudios previos realizado por ACI 522R-10 se seleccionó b/b<sub>0</sub> de 0.93 para huso granulométrico 67 de agregados figura 1. Seleccionando una w/c de 0.34 y un contenido de vacíos de 16 %, que es lo apropiado para poder obtener una resistencia óptima y adecuada permeabilidad.

Conforme a lo establecido a la normativa ACI 522R-10 para diseño de mezcla de concreto poroso se realizó las siguientes pruebas referidos en la tabla n° 1, cabe mencionar que el diseño de mezcla se hizo con 10 % de agregado fino. El diseño de mezcla se realizó 6 especímenes y para cada espécimen 3 muestras, con proporciones diferentes de agregado fino, así como refiere la tabla 2.

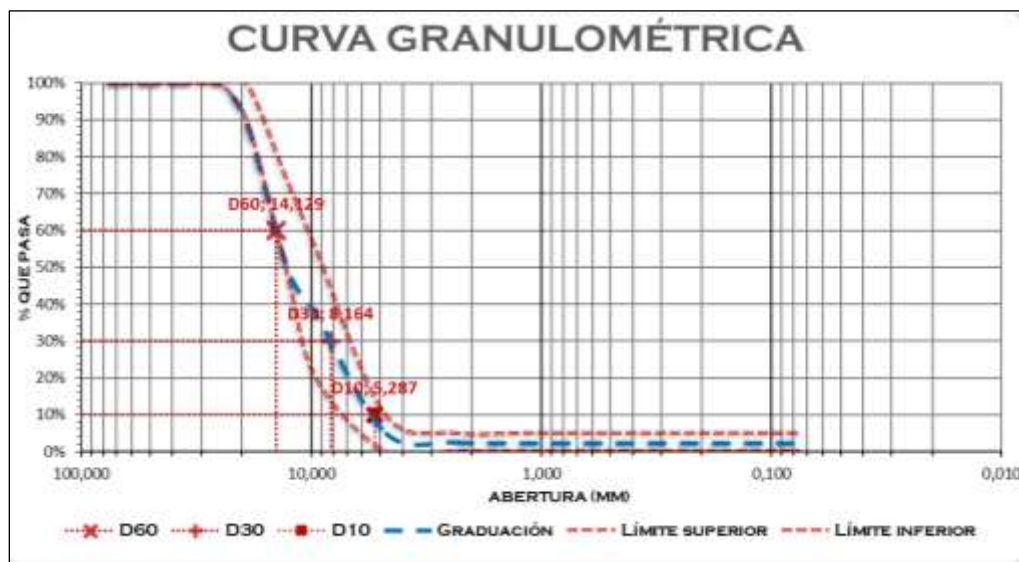


Figura 1: Granulometría de agregado grueso



Figura 2: Prueba cono de Abrams

#### D. Preparación del espécimen

Se realizó 6 especímenes de mezcla para la elaboración de muestras, primero se colocó el agua en la mezcladora, seguido por el cemento y después de 1 minuto el árido grueso y árido fino (microesferas de vidrio y escoria de cobre), continuando su mezcla por 3 minutos hasta obtener una mezcla que tenga un favorable adherencia de los materiales, en seguida fue situado la mezcla en los moldes previamente recubierto con aceite, esto con el fin de simplificar el desmoldado y prevenir pérdidas cuando se va retirar del molde.

**TABLA 1: PROPIEDADES DE CEMENTO Y AGREGADOS**

Material	Características
Densidad del cemento portland (kg/m <sup>3</sup> )	3000
Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Peso volumétrico de árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )	1489
Peso específico de árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )	2178
Gravedad específica de árido fino (kg/m <sup>3</sup> )	2250
Peso específico de microesferas de vidrio (kg/m <sup>3</sup> )	2350
Peso específico de escoria de cobre (kg/m <sup>3</sup> )	2820
Contenido de humedad (%)	1,70
Absorción (%)	1,78
Huso granulométrico de agregados	Huso 67

**TABLA 2: ESPECÍMENES DE MEZCLA DE CONCRETO PERMEABLE**

<b>N° de espécimen</b>	<b>Cantidad de muestras</b>	<b>Materiales (Agregado fino)</b>
1	3	10 % de agregado fino
2	3	5 % de microesferas de vidrio y 5 % de escoria de cobre
3	3	10 % de escoria de cobre
4	3	10 % de microesferas de vidrio
5	3	2,5 % de microesferas de vidrio y 7,5 de escoria de cobre
6	3	7,5 % de microesferas de vidrio y 2,5 de escoria de cobre

### 1) Resistencia a la compresión

Después de haber obtenido la trabajabilidad necesaria a través del ensayo de cono de Abrams se introduce la mezcla en los cilindros con medidas especificadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. El compactado se realizó en 3 capas con una varilla de 5/8", cada capa a 25 golpes de forma uniforme. El proceso de endurecimiento del concreto poroso se realizó en 7, 14 y 28 días. La prueba de la fuerza de compresión se realizó en una prensa automática para rotura de concreto como se muestra en la figura 3.

### 2) Resistencia a flexión

El módulo de rotura del concreto fue desarrollado a través de ensayo de vigas con medidas específicas de 15 cm de ancho, 15 cm de altura y una luz de 55 cm. El compactado se realizó en 3 capas con una varilla de 5/8", cada capa a 50 golpes de forma uniforme. El curado del concreto se realizó a 28 días. La prueba de módulo de rotura se realizó en una prensa automática configurada para rotura de una viga. Según ASTM C 78 – 02 [17] la aplicación de cargas fue a 1/3 de la luz de la viga y los apoyos a 5 cm del extremo de la viga como se aprecia en la figura 3.



Figura 3: Ensayo de resistencia a la compresión y a la flexión

### 3) Permeabilidad

Para diseñar la técnica de ensayo se utilizaron criterios de ensayo alternativos de ASTM - C09.49 y ACI 522R-10 [18]. Se fabricaron cilindros con muestras de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura. Como se observa en la figura 4, se utilizó un permeámetro para medir la permeabilidad del concreto permeable. Mediante una membrana de látex, esta técnica impermeabiliza los laterales de la muestra para impedir que el agua se filtre por ellos. La cubeta de la muestra y el tubo de drenaje se llenan de agua vertiéndose en la probeta graduada. La muestra se prepara dejando correr el agua por el tubo hasta que el nivel de la probeta graduada coincida con el nivel de la parte superior del tubo de drenaje. Esto reduce la cantidad de agua en la muestra y garantiza que esté completamente saturada.

$$k = \frac{L}{t} + \frac{a}{A} \times \ln \frac{h1}{h2}$$

Donde:

K: Índice de permeabilidad (cm/s)

L: Tamaño de la muestra (cm)

t: Tiempo de espera en pasar de h1 a h2 (s)

a: Superficie de la tubería de carga (cm<sup>2</sup>)

A: Superficie de la muestra (cm<sup>2</sup>)

h1: Medición de la altura de la columna de agua en relación al nivel de referencia (cm)

h2: Altura de la boca de salida de la tubería con relación al nivel de referencia (cm)

#### 4) Contenido de vacíos.

Para la prueba de contenido de vacíos se elaboró un espécimen con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Para el secado de la muestra se empleó un horno a una temperatura de  $100 \pm 5$  °C por 24 horas, después retirar la muestra del horno para ser enfriado por 1 a 3 horas y determinar su masa. Regresar la muestra al horno por 2 horas y de nuevo determinar la masa después del periodo del enfriamiento. Repetir este proceso en incrementos de 2 horas hasta que la diferencia entre dos medidas de masa sea menor que 0.5 % [19]. Después del secado la muestra debe sumergirse por completo en un baño de agua y reposar en posición vertical durante 30 minutos, pasado el tiempo se golpea la muestra con mazo de hule 10 veces muestras está bajo el agua, esto con el fin de liberar las cavidades de aire dentro del concreto poroso. Determinar la masa sumergida, manteniendo la muestra sumergida.

$$\text{Contenido de vacios} = \left[ 1 - \left( \frac{K(A - B)}{\rho_w \times D^2 \times L} \right) \right] \times 100$$

Donde:

D: Diámetro promedio de la muestra (cm)

L: Tamaño promedio de la muestra (cm)

A: Peso en seco de la muestra (gr.)

B: Peso sumergido de la muestra (gr.)

$\rho_w$ : Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

K:  $1274240 \frac{mm^3 \times kg}{m^3 \times gr}$

#### 5) Aislador térmico

Para la prueba de aislador térmico se elaboró una muestra con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, para medir la diferencia de temperaturas primero se registró su temperatura de cada muestra en estado fresco, después se llevó a una congeladora y se hizo una medición de la temperatura de cada muestra pasado los 30 minutos.



Figura 4: Ensayo de permeabilidad, contenido de vacíos y aislador térmico.

#### IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Después de recopilar los datos en la sección previa, se elaboró el análisis y debate de los resultados de la investigación con el fin de evaluarlos y compararlos, teniendo en cuenta una de las fases más relevantes y aplicables.

La fuerza de compresión y el módulo de rotura se ven influidas significativamente por la proporción agua-cemento y la cantidad de huecos. Según Pingzhong Zhao [20] la permeabilidad del concreto aumentará, pero su resistencia a la compresión y a la flexión disminuirá a medida que aumente el contenido en huecos. El contenido en huecos y la proporción agua-cemento están directamente correlacionados; una relación menor conduce a un aumento del contenido en huecos, y viceversa. En este estudio, se buscaron el contenido en huecos y la relación agua-cemento ideales (0,34 y 16%) para obtener la permeabilidad, la fuerza de compresión y a la flexión y otras propiedades requeridas.

El análisis de resultados por la prueba de homogeneidad de varianzas con prueba estadística ANOVA – Tukey que nos sirve para comparar las medias de varios grupos independientes y a la vez nos muestra que hay una diferencia significativa al menos en una de las medias, entre los resultados de fuerza de compresión, módulo de rotura, permeabilidad, contenido de vacíos y aislador térmico para concreto permeable con escoria de cobre y microesferas de vidrio, nos muestra la varianza de las medias para cada grupo independiente.

La regla de decisiones para la prueba de hipótesis nula y alterna “cuando la hipótesis nula  $H_0 > 0.05$  nos indica que no existe diferencias de las medias de los independientes y cuando la hipótesis alterna  $H_1 < 0.05$  nos indica que si existe diferencia de las medias de los grupos independientes”.

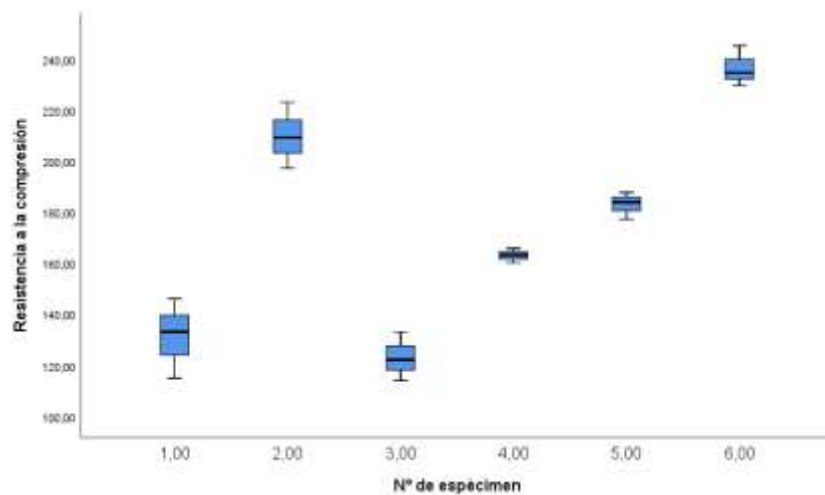


Figura 5: Fuerza de compresión

De acuerdo a la figura 5 y lo detallado en la tabla 2 se muestran los resultados a la fuerza de compresión del concreto a 28 días para los 6 especímenes, por lo que se realizó un análisis estadístico donde el nivel de significancia será  $p=0 < 0.05$  y respectivamente la comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.

TABLA 3: ANÁLISIS DE VARIANZA CON NIVEL DE SIGNIFICANCIA,  $A=0.05$

ANOVA					
VAR00003	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	29491,165	5	5898,233	58,458	0,000
Dentro de grupos	1210,76	12	100,897		
Total	30701,925	17			

De acuerdo a la tabla 3, donde el nivel de significancia  $p=0 < 0.05$ , en consecuencia, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, es decir a menos una de las medias es diferente.

**TABLA 4: COMPARACIÓN DE VARIANZAS CON UNA CONFIANZA DE 95 % - TUKEY**  
**VAR00003**

HSD Tukey		Subconjunto para alfa = 0.05			
Nº de espécimen	N	1	2	3	4
3	3	123,167 kgf/cm <sup>2</sup>			
1	3	131,467 kgf/cm <sup>2</sup>			
4	3		163,133 kgf/cm <sup>2</sup>		
5	3		183,133 kgf/cm <sup>2</sup>	183,133 kgf/cm <sup>2</sup>	
2	3			210,033 kgf/cm <sup>2</sup>	210,033 kgf/cm <sup>2</sup>
6	3				236,767 kgf/cm <sup>2</sup>
Sig.		0,905	0,217	0,057	0,059

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

De acuerdo a tabla 4, la prueba post hoc Tukey nos muestra que en el espécimen nº 1 y 3, 4 y 5, 2 y 5, 2 y 6 no existe diferencia significativa de medias debido a que el valor de significancia es  $p > 0.05$ , lo que indica que aceptamos la hipótesis nula, sin embargo, conforme a la prueba ANOVA hemos rechazado la hipótesis nula. En los demás especímenes las medias de los grupos son estadísticamente significativa porque el valor de significancia  $p < 0.05$ .

Según la interpretación de los resultados a resistencia a compresión a 28 días mostrados en la figura 5 y tabla 4. Los especímenes 2 y 6 (incorporado con 5 % escoria de cobre y 5 % de microesferas de vidrio; 2.5 escoria de cobre y 7.5 microesferas de vidrio respectivamente) presentan los valores más elevados para esta propiedad, lo que sugiere que la combinación de los materiales (escoria de cobre y microesferas de vidrio) en las cantidades recomendadas contribuye a aumentar el esfuerzo de compresión del concreto. La fuerza de compresión de los especímenes, con la excepción de los especímenes 1, 3 y 4 (incorporado con 10 % de agregado fino; 10 % escoria de cobre; 10 % microesferas de vidrio respectivamente), fue superior a 175 kgf/cm<sup>2</sup>, superando los criterios mínimos establecidos para pavimentos especiales descritos [21].

Araújo et al.[22] Estudiaron el uso de escoria de cobre como agregado fino para concreto permeable y encontraron que la menor resistencia a compresión se registró con un valor de 97.38 kgf/cm<sup>2</sup> y como mayor resistencia a la compresión fue de 226.07 kgf/cm<sup>2</sup>, corroborando con el presente estudio.

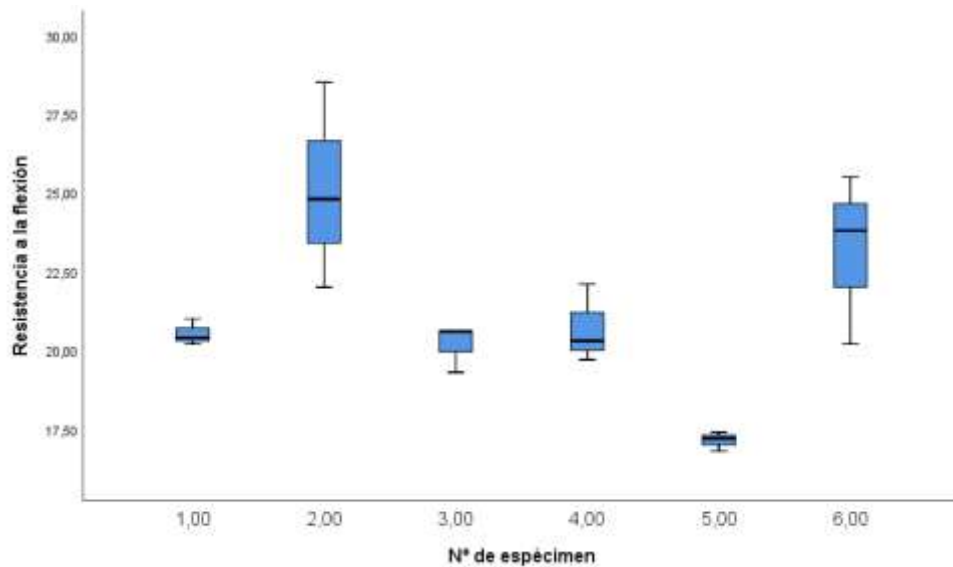


Figura 6: Resistencia a la flexión

De acuerdo a la figura 6 y lo detallado en la tabla 2 se muestran los resultados a la fuerza de flexión del concreto a 28 días para los 6 especímenes, por lo que se realizó un análisis estadístico donde el nivel de significancia será  $p=0 < 0.05$  y respectivamente la comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.

**TABLA 5: ANÁLISIS DE VARIANZA CON NIVEL DE SIGNIFICANCIA  $\alpha=0.05$**   
ANOVA

<b>VAR00004</b>	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	112,053	5	22,411	6,61	0,004
Dentro de grupos	40,687	12	3,3910		
Total	152,74	17			

De acuerdo a la tabla 5, donde el nivel de significancia  $p=0 < 0.05$ , en consecuencia, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, es decir a menos una de las medias es diferente.

**TABLA 6: COMPARACIÓN DE VARIANZAS CON UNA CONFIANZA DE 95 % - TUKEY**  
**VAR00004**

HSD Tukey			
N° de espécimen	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
5	3	17,133 kgf/cm <sup>2</sup>	
3	3	20,167 kgf/cm <sup>2</sup>	20,167 kgf/cm <sup>2</sup>
1	3	20,533 kgf/cm <sup>2</sup>	20,533 kgf/cm <sup>2</sup>
4	3	20,700 kgf/cm <sup>2</sup>	20,700 kgf/cm <sup>2</sup>
6	3		23,167 kgf/cm <sup>2</sup>
2	3		25,100 kgf/cm <sup>2</sup>
Sig.		0,239	0,057

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Conforme a la tabla 6, la prueba post hoc Tukey nos muestra que los especímenes no tienen diferencia significativa de medias, a excepción del espécimen n° 5 y 6, 2 y 5, debido a que el valor de significancia es  $p > 0.05$ , lo que indica que aceptamos la hipótesis nula, sin embargo, conforme a la prueba ANOVA hemos rechazado la hipótesis nula.

Las mediciones de módulo de rotura a los 28 días para todos los diseños se presentan en la figura 6 y tabla 6. Se nota que al integrar microesferas de vidrio y escoria de cobre en un 5 % cada uno, seguido por 7.5 microesferas de vidrio y 2.5 % escoria de cobre, se alcanzó el valor más alto para esta propiedad. Esto sugiere que las características de las microesferas de vidrio y la escoria de cobre son favorables para la elaboración de concreto permeable. Estos resultados son útiles para determinar si se satisfacen las especificaciones requeridas o como referencia para la dosificación y aplicación de pavimentos especiales.

Araújo et al.[22] Estudiaron el uso de escoria de cobre como agregado fino para concreto permeable y encontraron que la menor resistencia a flexión se registró con un valor de 12.44 kgf/cm<sup>2</sup> y como mayor resistencia a flexión fue de 39.15 kgf/cm<sup>2</sup>, corroborando con el presente estudio.

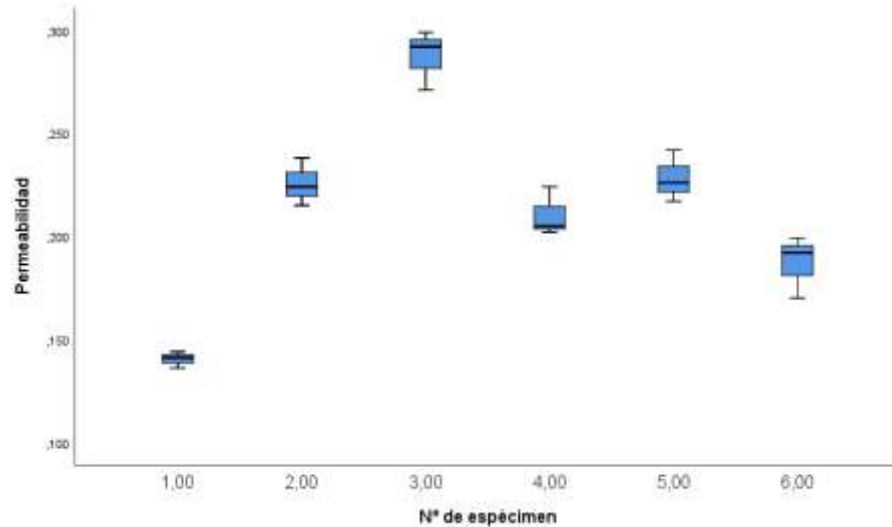


Figura 7: Permeabilidad

De acuerdo a la figura 7 y lo detallado en la tabla 2 se muestran los resultados a la permeabilidad del concreto a 28 días para los 6 especímenes, por lo que se realizó un análisis estadístico donde el nivel de significancia será  $p=0 < 0.05$  y respectivamente la comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.

TABLA 7: ANÁLISIS DE VARIANZA CON NIVEL DE SIGNIFICANCIA  $\alpha=0.05$

<b>ANOVA</b>					
<b>VAR00005</b>					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,036	5,000	0,007	47,821	0,000
Dentro de grupos	0,002	12,000	0,000		
Total	0,037	17,000			

De acuerdo a la tabla 7, donde el nivel de significancia  $p=0 < 0.05$ , en consecuencia, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, es decir a menos una de las medias es diferente.

**TABLA 8: COMPARACIÓN DE VARIANZA CON UNA CONFIANZA DE 95 % - TUKEY**

**VAR00005**

HSD Tukey		Subconjunto para alfa = 0.05			
Nº de espécimen	N	1	2	3	4
1	3	0,1403 cm/s			
6	3		0,1870 cm/s		
4	3		0,2103 cm/s	0,2103 cm/s	
2	3			0,2257 cm/s	
5	3			0,2283 cm/s	
3	3				0,2873 cm/s
Sig.		1,00	0,25	0,50	1,00

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
 a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

De acuerdo a tabla 8, la prueba post hoc Tukey nos muestra que en el espécimen nº 1; 4 y 6; 2, 4 y 5; 6 no existe diferencia significativa de medias debido a que el valor de significancia es  $p > 0.05$ , lo que indica que aceptamos la hipótesis nula, sin embargo, conforme a la prueba ANOVA hemos rechazado la hipótesis nula. En los demás especímenes las medias de los grupos son estadísticamente significativa porque el valor de significancia  $p < 0.05$ .

La gráfica 3 y la tabla 8 indica el índice de permeabilidad del concreto permeable. A excepción del espécimen 1, todos los demás especímenes presentaban una permeabilidad dentro del intervalo de los estándares de ACI 522R-10 [18]. Podemos apreciar que al incorporar 10 % de escoria de cobre se obtiene un drenaje más rápido del agua a través de sus poros del concreto permeable, esto indica que la escoria de cobre por su textura y composición mejora en la permeabilidad del concreto poroso. Al incorporar 7.5 escoria de cobre y 2.5 microesferas de vidrio, 5 % escoria de cobre y 5 % microesferas de vidrio podemos apreciar resultados similares, lo que indica que la combinación de escoria de cobre con microesferas de vidrio tiene un comportamiento favorable en el drenado del agua para concreto poroso. La permeabilidad de los poros viene determinada principalmente por su forma y número. Pingzhong Zhao afirma que el contenido de huecos influye en la evolución de la permeabilidad del concreto permeable. Además, a medida que aumenta la proporción agua-cemento, disminuye el contenido en huecos y viceversa, lo que sugiere que para regular la permeabilidad del concreto permeable es fundamental lograr un equilibrio entre ambas variables. El concreto permeable tiene un coeficiente de permeabilidad que oscila entre 0,14 cm/s y 1,22 cm/s, según los estándares de ACI 522R-10.

Araújo et al.[22] Estudiaron el uso de escoria de cobre como agregado fino para concreto permeable y encontraron que la menor coeficiente de permeabilidad se registró con un valor de 0.074

cm/s y como mayor coeficiente de permeabilidad fue de 1.87 cm/s, en este caso el resultado menor y mayor no está dentro del rango permisible según los estándares de ACI 522R-10.

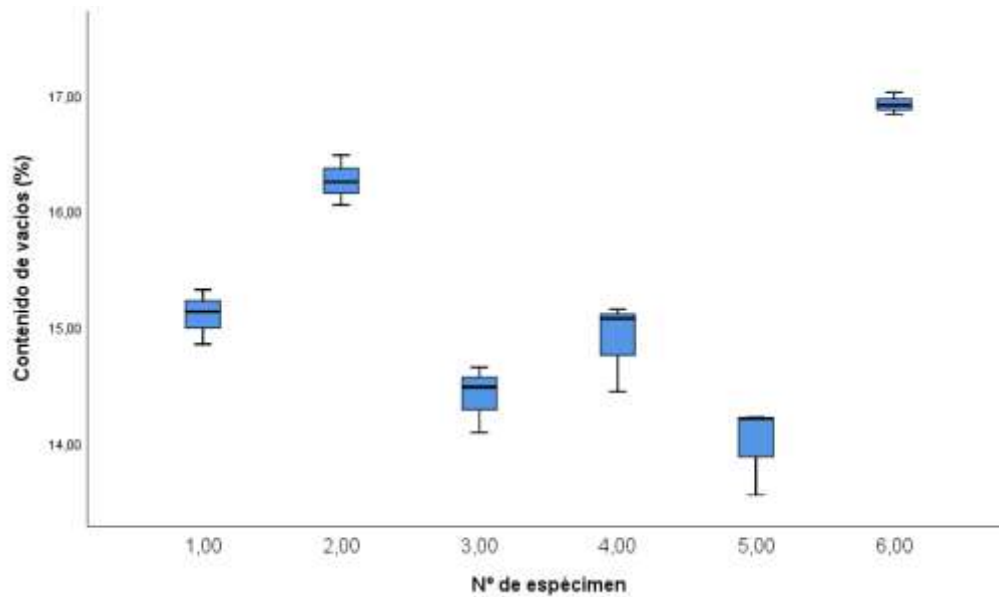


Figura 8: Contenido de vacíos

De acuerdo a la figura 8 y lo detallado en la tabla 2 se muestran los resultados del contenido de vacíos del concreto para los 6 especímenes, por lo que se realizó un análisis estadístico donde el nivel de significancia será  $p=0 < 0.05$  y respectivamente la comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.

TABLA 9: ANÁLISIS DE VARIANZA CON NIVEL DE SIGNIFICANCIA  $\alpha=0.05$

ANOVA					
VAR00006					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	18,76	5	3,752	45,718	0,000
Dentro de grupos	0,985	12	0,082		
Total	19,744	17			

De acuerdo a la tabla 9, donde el nivel de significancia  $p=0 < 0.05$ , en consecuencia, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, es decir a menos una de las medias es diferente.

TABLA 10: COMPARACIÓN DE VARIANZA CON UNA CONFIANZA DE 95 % - TUKEY

HSD Tukey		VAR00006		
Nº de espécimen	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
5	3	13,9933 %		
3	3	14,4067 %	14,4067 %	
4	3		14,8867 %	
1	3		15,1000 %	
2	3			16,2600 %
6	3			16,9200 %
Sig.		0,518	0,096	0,121

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

De acuerdo a tabla 10, la prueba post hoc Tukey nos muestra que en el espécimen nº 3 y 5; 1, 3 y 4; 2 y 6 no existe diferencia significativa de medias debido a que el valor de significancia es  $p > 0.05$ , lo que indica que aceptamos la hipótesis nula, sin embargo, conforme a la prueba ANOVA hemos rechazado la hipótesis nula. En los demás especímenes las medias de los grupos son estadísticamente significativa porque el valor de significancia  $p < 0.05$ .

Según la figura 8 y la tabla 10, las proporciones de mezcla para concreto poroso se compusieron con 16 % de contenido de vacíos para todos los especímenes. Los resultados para cuantificar la porosidad de concreto permeable endurecido se muestran en la figura 8. Se puede apreciar que el espécimen nº 2 es la que más se aproxima al valor inicial del diseño de cantidad de vacíos, esto indica que al incorporar 5 % de microesferas de vidrio y 5 % escoria de cobre en la proporción de mezcla de concreto permeable ayuda a controlar de forma eficiente el contenido de vacíos porque las microesferas de vidrio actúan como espaciadores microscópicos, creando vacíos adicionales en la matriz del cemento, esto aumenta la porosidad y permeabilidad del concreto, permitiendo un mejor drenaje del agua. El espécimen nº 6 (7.5 % microesferas de vidrio y 2.5 escoria de cobre) brinda un resultado próximo al valor del espécimen nº 2, lo que indica que también es aceptable para controlar el contenido de vacíos. Los especímenes nº 1, 3, 4, 5 (10 % agregado fino; 10 % escoria de cobre; 10 % microesferas de vidrio; 7.5 escoria de cobre y 2.5 microesferas de vidrio respectivamente) presentan resultados alejados al valor inicial del diseño de contenido de vacíos, lo que indica que no son eficientes para controlar el contenido de vacíos en concreto permeable.

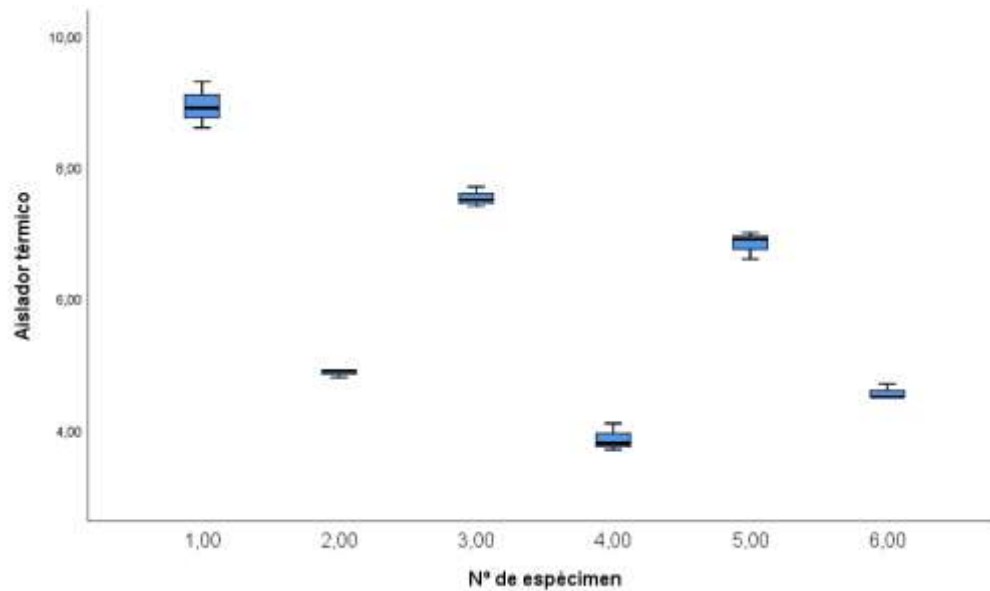


Figura 9: Aislador térmico

De acuerdo a la figura 9 y lo detallado en la tabla 2 se muestran los resultados del aislador térmico del concreto en estado fresco para los 6 especímenes, por lo que se realizó un análisis estadístico donde el nivel de significancia será  $p=0 < 0.05$  y respectivamente la comparación de varianzas con una confianza de 95 % - Tukey.

TABLA 11: ANÁLISIS DE VARIANZA CON NIVEL DE SIGNIFICANCIA  $\alpha=0.05$   
ANOVA

VAR00007					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	58,44	5	11,688	280,512	0,000
Dentro de grupos	0,5	12	0,042		
Total	58,94	17			

De acuerdo a la tabla 11, donde el nivel de significancia  $p=0 < 0.05$ , en consecuencia, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, es decir a menos una de las medias es diferente.

**TABLA 12: COMPARACIÓN DE VARIANZA CON UNA CONFIANZA DE 95 % - TUKEY**

<b>VAR00007</b>						
HSD Tukey a						
N° de espécimen	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
4	3	3,8667 °C				
6	3		4,5667 °C			
2	3		4,8667 °C			
5	3			6,8333 °C		
3	3				7,5333 °C	
1	3					8,9333 °C
Sig.		1,00	0,50	1,00	1,00	1,00

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.  
a Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Conforme a la tabla 12, la prueba post hoc Tukey nos muestra que los especímenes si tienen diferencia significativa de medias, a excepción del espécimen nº 2 y 6 debido a que el valor de significancia es  $p < 0.05$ , lo que indica que rechazamos la hipótesis nula tal y como se propuso en la prueba ANOVA.

Los resultados del aislador térmico para concreto permeable se muestran en la figura 9 y la tabla 12. Se puede notar que el espécimen nº 2, nº 4 y nº 6 (5 % escoria de cobre y 5 % microesferas de vidrio; 10 % microesferas de vidrio; 7.5 % microesferas de vidrio y 2.5 % escoria de cobre respectivamente) son los de baja conductividad térmico, esto indica que las microesferas de vidrio es un material con una conductividad baja e inherentemente aislante. Mientras que los especímenes nº 1, 3, 5 (10 % agregado fino; 10 % escoria de cobre; 7.5 % escoria de cobre y 2.5 % microesferas de vidrio respectivamente) son buenos conductores térmicos, esto puede alterar de forma negativa las propiedades del concreto. Cuando se añade al concreto, las microesferas de vidrio crean poros de aire adicionales en la matriz del cemento, puesto que el aire es un excelente aislador térmico, lo que reduce aún más la conductividad térmica general del material [23].

Según [24] el propósito de tal investigación consiste en mejorar el módulo de seguridad de batería usando microesferas de vidrio como aislante. Se constató que hay una reducción mínima en cuanto a las propiedades mecánicas y un óptimo resultado ante las propiedades térmicas.

## V. CONCLUSIONES

Se determinó las propiedades de concreto permeable con escoria de cobre y microesferas de vidrio, por lo tanto, se concluye que el espécimen n° 2 es el resultado más óptimo para los pavimentos especiales, debido a que al incorporar 5 % de escoria de cobre y 5 % microesferas de vidrio se obtiene resultados óptimos para las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de concreto permeable. Los resultados de la resistencia a la compresión revelan que al usar 5 % de escoria de cobre y 5 % de microesferas de vidrio mejora la resistencia, aunque no obtiene el valor más alto, pero si es la más eficiente en su propiedad física, mecánica e hidráulica. El espécimen n° 6 es las más eficiente después del espécimen n° 2, sin embargo, alcanza resultado eficiente solo en la resistencia a la compresión, mientras que su permeabilidad y contenido de vacíos es deficiente según las exigencias del reporte ACI 522R-10. Al incorporar 5 % de microesferas de vidrio y 5 % de escoria de cobre en concreto permeable produce una variación ligera en la permeabilidad, presentando un resultado apropiado según las exigencias del reporte ACI 522R-10, sin embargo, se observó que al agregar 10 % de escoria de cobre en el concreto permeable se obtuvo resultados más eficientes que los otros especímenes, esto indica que posee mayor cantidad de vacíos, teniendo una fuerza compresiva y módulo de rotura deficiente, por lo tanto, se concluye que el diseño n° 2 (5 % microesferas de vidrio y 5 % escoria de cobre) es la más eficiente, debido a que sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas son aceptables para emplear en los pavimentos especiales.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda efectuar pruebas de esfuerzo a la compresión a edades extendidas, superiores a los 90 días, con el fin de examinar el avance de esfuerzo a la compresión del concreto permeable modificado con escoria de cobre y microesferas de vidrio. Estas pruebas buscan facilitar una asimilación más integral del desempeño a largo plazo del concreto, permitiendo así una evaluación más precisa de su resistencia y durabilidad en condiciones de servicio realistas. Al extender el período de evaluación más allá de los 90 días, se espera capturar de manera más completa la evolución gradual de la resistencia del concreto a lo largo del tiempo. Este enfoque es particularmente relevante para aplicaciones donde se requiere una vida útil prolongada y una resistencia sostenida. Los resultados de estos ensayos ofrecerán información valiosa sobre cómo las propiedades del concreto permeable se desarrollan con el tiempo y ayudarán a optimizar su diseño para garantizar un rendimiento duradero y confiable en diversas aplicaciones.

Para complementar los resultados del permeámetro, considerar métodos alternativos para medir la permeabilidad, como el ensayo de carga constante o el ensayo de infiltración in situ.

Investigar el uso de equipos más sofisticados, como el medidor de flujo de calor o el analizador de conductividad térmica transitoria, para obtener mediciones más precisas de la conductividad térmica del concreto permeable.

## VII. REFERENCIAS

- [1] L. Choque and L. Clemente, “Ladrillo reciclado para elaboración de pavimento permeable para parqueaderos,” *Novasinerгия Rev. Digit. Ciencia, Ing. Y Tecnol.*, vol. 6, no. 1, pp. 19–35, 2023, doi: 10.37135/ns.01.11.02.
- [2] E. Cárdenas Gutiérrez, Á. Albiter Rodríguez, and J. Jaimes Jaramillo, “Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua,” *Cienc. ergo sum*, vol. 24, no. 2, pp. 173–180, 2017, doi: 10.30878/ces.v24n2a9.
- [3] J. Alejandra, S. Ordinola, M. Antonio, and C. Vasquez, “polietileno en las propiedades de resistencia y permeabilidad de pavimento de concreto polyethylene terephthalate on the strength and permeability properties of concrete pavement,” vol. 22, pp. 2–8, 2022, doi: 10.36561/ING.22.2.
- [4] J. E. Ayala-López, E. Gil-Ahumada, R. D. Cornejo-Ramos, and S. P. Muñoz-Pérez, “Metodologías empleadas para la producción de concreto permeable usando parcialmente materiales reciclados como agregados: una revisión literaria,” *TecnoLógicas*, vol. 25, no. 53, p. e2080, 2022, doi: 10.22430/22565337.2080.
- [5] M. R. Pinto, C. Carrasco, and K. Caballero, “Estudio experimental del concreto poroso con la incorporación de distintas granulometrías,” *I+D Tecnológico*, vol. 14, no. 2, pp. 57–65, 2018, doi: 10.33412/idt.v14.2.2074.
- [6] G. Olivares-Cerpa, B. Russo, M. Martínez-Puentes, E. Bladé, and M. Sanz-Ramos, “‘SUDS-lineales’ para reducir el riesgo de inundación considerando escenarios de Cambio Climático,” *Ing. del Agua*, vol. 26, no. 2, pp. 77–90, 2022, doi: 10.4995/ia.2022.17058.
- [7] J. P. Valencia Villegas, A. M. González Mesa, and O. F. Arbelaez Perez, “Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas,” *Lámpsakos*, no. 22, pp. 16–26, 2019, doi: 10.21501/21454086.3283.
- [8] C. H. Ccori, “Sustitución de los Agregados por Escoria de Cobre en la Elaboración del Concreto,” *Cienc. Desarro.*, 2000, doi: 10.33326/26176033.2008.12.254.
- [9] P. Ronald, G. Chayña, and C. E. Guerra Ramos, “Design of a rigid permeable pavement as a sustainable urban drainage system,” p. 121, 2020.
- [10] D. Frentress, “Pervious concrete,” *Concr. Constr. - World Concr.*, vol. 60, no. 11–12, 2015, doi: 10.1007/978-3-642-41714-6\_161018.
- [11] ASTM C143-03, “ASTM C 143/C 143M – 03 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-

- Cement Concrete,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–4, 2003.
- [12] ASTM C 150, “Especificación normalizada para cemento Portland,” *Am. Soc. Test. Mater.*, pp. 1–11, 2007.
- [13] M. Translated, Y. Li, S. Zhang, R. Wang, and F. Dang, “Machine Translated by Google Materiales de Construcción y Construcción Uso potencial como agregado en exhaustiva Yang Machine Translated by Google,” 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.183.
- [14] A. Fahdi, “Machine Translated by Google Investigación sobre cemento y hormigón Caracterización experimental y computacional de compuestos cementosos de de Machine Translated by Google,” 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106671.
- [15] M. Translated, K. Kawaai, and I. Ujike, “Machine Translated by Google Materiales de Construcción y Construcción fino sobre y en probetas prismáticas Keiyu Machine Translated by Google,” 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121909.
- [16] M. Translated, “Machine Translated by Google Comportamiento estático y cíclico de de hormigón reforzado con fibras con escoria de cobre como árido Machine Translated by Google,” 2024, doi: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0323>.
- [17] American Society of Testing Materials (ASTM C 78 /C78M-18), “ASTM C 78 /C78M-18 Método de ensayo normalizado para determinar la resistencia a la flexión del hormigón (Usando una viga simple con carga en los tercios),” vol. 04, p. 5, 2018, [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [18] bidin A, “Опыт аудита обеспечения качества и безопасности медицинской деятельности в медицинской организации по разделу «Эпидемиологическая безопасность» No Title,” *Вестник Росздравнадзора*, vol. 4, no. 1, pp. 9–15, 2017, doi: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0335>.
- [19] “GUATEMALTECA,” no. 502, 2016.
- [20] M. Translated, “Investigación sobre la predicción de resistencia del hormigón permeable basada en la porosidad de diseño y la relación Introducción,” 2024.
- [21] P. Urbanos and D. Y. Objetivo, “Norma técnica ce. 010 pavimentos urbanos,” p. 68, 2010, [Online]. Available: <http://www.vivienda.gob.pe/%5Cnhttp://app.knovel.com/>.
- [22] W. M. P. de Araújo, F. P. Avelino, M. de S. Picanço, and A. N. Macêdo, “Study of the physical and mechanical properties of permeable concrete with the addition of TiO<sub>2</sub> for the treatment of sewage,” *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 13, no. 5, Oct. 2020, doi: 10.1590/S1983-41952020000500014.
- [23] M. Translated *et al.*, “Machine Translated by Google Compuestos de cemento y hormigón

Ingeniería de compuestos cementosos de resistencia específica y baja conductividad térmica con microesferas de vidrio huecas para aplicaciones de temperatura y Javad Machine Translated by Google,” 2020.

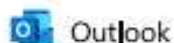
- [24] Y. Yu *et al.*, “Enhancing battery module safety with insulation material: Hollow glass microspheres incorporating aerogel of varying particle sizes,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 478, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.147400.

## ANEXOS

### Anexo A. Evidencia de la sumisión de la tesis

9/10/24, 21:56

Correo: ROY GILBER CCARITA CCARITA - Outlook



---

**RE: [AiBi] Acuse de recibo de envío**

---

**Desde** ROY GILBER CCARITA CCARITA <royccarita@upeu.edu.pe>

**Fecha** Mar 16/07/2024 10:37

**Para** Zulmary Carolina Nieto Sánchez <editor\_aibi@cucuta.udes.edu.co>

Buen día, cuanto tiempo como máximo demora en responder en cuanto al envío del artículo

---

**De:** Zulmary Carolina Nieto Sánchez via Revistas Científicas Universidad de Santander <revistaojs@campus.udes.edu.co>

**Enviado:** viernes, 5 de julio de 2024 17:32

**Para:** ROY GILBER CCARITA CCARITA <royccarita@upeu.edu.pe>

**Asunto:** [AiBi] Acuse de recibo de envío

Roy Ccarita Ccarita:

Gracias por enviar el manuscrito "la Evaluación de las propiedades en Concretos Permeables con Escoria de Cobre y Microesferas de Vidrio para pavimentos especiales" a AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://revistas.udes.edu.co/aibi/authorDashboard/submission/4181>

Nombre de usuario/a: royccarita

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Zulmary Carolina Nieto Sánchez

---

[AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería](#)

## Anexo B. Copia de resolución



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

## RESOLUCIÓN N° 1026-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 26 de diciembre de 2023

## VISTO:

El expediente de **Jarol Kevin Cruz Mayta**, identificado(a) con Código Universitario N° 201820241 y **Roy Gilber Ccarita Ccarita**, identificado(a) con Código Universitario N° 201711650, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

## CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Jarol Kevin Cruz Mayta** y **Roy Gilber Ccarita Ccarita**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Análisis de la escoria de cobre y microesfera de vidrio como sustituto de agregado fino de un concreto permeable" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 26 de diciembre de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

## SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Análisis de la escoria de cobre y microesfera de vidrio como sustituto de agregado fino de un concreto permeable" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Mg. Edwin Parillo Escarsena** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Jose Pacori Pacori** y **Mg. Arnaldo Cahui Galarza**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Mg. Ketty Magaly Arellano Lino  
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:  
-Interesado  
-Asesor  
-Dirección General de Investigación  
-Archivo

## Anexo C. Constancia de ensayos



ESCUELA PROFESIONAL DE  
INGENIERIA CIVIL

### CONSTANCIA

El que suscribe Ing. Herson Duberly Pari Cusi; Coordinador de la escuela profesional de Ingeniería Civil y el jefe de laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca.

#### HACE CONSTAR:

Que el bachiller de Ingeniería Civil:

**JAROL KEVIN CRUZ MAYTA** con Código Universitario N° 201820241

**ROY GILBER CCARITA CCARITA** con Código Universitario N° 201711650


Ha realizado ensayos en el laboratorio de Tecnología de Concreto y ensayos de los materiales, para completar su trabajo de tesis denominado: "Evaluación de las propiedades en Concretos Permeables con Escoria de Cobre y Microesferas de Vidrio para pavimentos especiales" con la finalidad de obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Los trabajos se realizaron el: 08/01/2024 al 15/03/2024.

Los ensayos efectuados por los tesisistas fueron los siguientes:

- Contenido de humedad
- Granulometría (A. grueso)(A. fino)
- Peso unitario suelto (A.G.)
- Peso unitario compactado (A.G.)
- Peso específico y Porcentaje de Absorción. (A.G)
- Peso específico y porcentaje de Absorción. (A.F, Escoria y microesferas)
- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Densidad y porcentaje de vacíos
- Uso de congeladora (18 briquetas de 11 cm x 20 cm)


Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que estime por conveniente.

Juliaca, Villa Chulluanqui, 06 de Mayo de 2024



---

Ing. Herson Duberly Pari Cusi  
Coordinador E.P de Ingeniería Civil



---

Bachiller Yheyson Salas Pampa  
Jefe de Laboratorio de Concreto

Anexo D. Instrumentos utilizados

